



Abschlußbericht

Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Getreide und halmgutartigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen in der Praxis

Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Themen – Nr.: 42.26.430

Projekt / Förderkennzeichen (FKZ): 22018003

Langtitel: Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Getreide und halmgutartigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen in der Praxis

Kurztitel: Getreideverbrennung

Projektleiter: Dipl.-Ing. Thomas Hering

Abteilung: Pflanzenproduktion

Abteilungsleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Laufzeit: 11/2004 bis 01/2009

Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Namen der Bearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Hering, Dipl.-Ing. (FH) Denis Peisker

Kooperationspartner: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Referat 43

Unterauftragnehmer: Institut für Luft und Kältetechnik

Jena, im Oktober 2009

(Peter Ritschel)

(Dr. habil. Armin Vetter)

Präsident

Abteilungsleiter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Zielsetzung des Projektes.....	8
1.2	Projektpartner	8
1.3	Arbeitsplan	11
1.4	Methodik	16
1.4.1	Analytik der Brennstoffe.....	16
1.4.2	Analytik der Emissionsparameter	16
2	Untersuchungsprogramm und Ergebnisse der Brennstoffanalysen.....	18
2.1	Beschreibung der untersuchten Feuerungsanlagen.....	18
2.1.1	Vorschubtreppenrostfeuerung der Firma REKA A/S (Dänemark)	18
2.1.2	Unterschubfeuerung der Firma Agroflam (Deutschland)	22
2.1.3	Rostfeuerung der Firma Guntamatic (Österreich)	22
2.1.4	Schubbodenfeuerung der Firma Passat Energi A/S (Dänemark).....	23
2.1.5	Kettenumlaufrostfeuerung der Firma Heizomat (Deutschland)	24
2.1.6	Brennmuldenfeuerung der Firma Ökotherm (Deutschland).....	25
2.1.7	Unterschubfeuerung Firma Biokompakt (Österreich)	26
2.1.8	Ganzballenvergaser Firma Herlt (Deutschland)	27
2.1.9	Brennmuldenfeuerung Firma Linka Maskinfabrik A/S (Dänemark) ..	29
2.1.10	Unterschubfeuerung der Firma Innovative Heiztechnik (IHT) (Deutschland) und Vorschubtreppenrostfeuerung der Firma Schmid (Schweiz)	31
2.2	Beschreibung der eingesetzten Brennstoffe	32
2.3	Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen.....	34
2.3.1	Emissionsrelevante Brennstoffeigenschaften.....	34
2.3.1.1	Stickstoff.....	34
2.3.1.2	Schwefel.....	36
2.3.1.3	Chlor.....	37
2.3.2	Sonstige Brennstoffeigenschaften	38
2.3.2.1	Mineralische Inhaltsstoffe	38
2.3.2.2	Ascheerweichungsverhalten.....	41
2.3.2.3	Aschegehalt.....	42
2.3.2.4	Heizwert	44
2.3.3	Relevante Elemente für die Bildung von Aerosolen	44
2.3.4	Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung	45
2.4	Fazit der Brennstoffanalysen.....	45

3	Ergebnisse der Emissionsmessungen	47
3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Strohfeuerungsanlagen bzw. neuartigen Anlagen.....	50
3.1.1	Anlagen im Leistungsbereich < 50 kW.....	50
3.1.2	Anlagen im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 kW.....	59
3.1.3	Anlagen im Leistungsbereich zwischen 100 kW und 1 MW.....	64
3.1.4	Schlussfolgerungen für die untersuchten Strohfeuerungsanlagen ...	70
3.1.5	Ergebnisse neuartiger Anlagen.....	71
3.2	Messergebnisse der kontinuierlichen Emissionsparameter	74
3.2.1	Kohlenmonoxidemissionen (CO).....	74
3.2.2	Gesamtstaubemissionen	83
3.2.2.1	Entwicklung und Test neuartiger und kostengünstiger Staubabscheidetechnologien (FuE Teil TLL / ILK).....	92
3.2.2.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Schutzrechte.....	106
3.2.2.3	Praxistests weiterer Staubabscheidetechnologien (DEULA).....	106
3.2.3	Stickoxidemissionen (NO _x).....	107
3.2.4	Kombinierter Anlagenvergleich für CO – Staub – NO _x	114
3.2.5	Schwefeloxidemissionen (SO _x)	117
3.2.6	Chlorwasserstoffemissionen (HCl)	119
3.3	Ergebnisse der speziellen diskontinuierlichen Messungen	122
3.3.1	Emissionen an Polychlorierten Dibenzo– Dioxinen und Furanen (PCDD/F) und Polychlorierten Biphenylen (PCB)	123
3.3.2	Emissionen an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Benzo(a)pyren	130
3.3.3	Emissionen an Benzol, Toluol und Xylol (BTX)	133
3.3.3.1	Ergebnisse der BTX Messungen.....	133
3.3.3.2	Ergebnisse der Benzol Messungen.....	135

4	Ergebnisse der Forschungsaktivitäten – Zusammenfassung	137
4.1	FH Bingen (FKZ 22017903) Entwicklung einer Low-NO _x -Feuerung nach dem FLOX-Prinzip in Kleinfeuerungsanlagen < 50 kW.....	137
4.2	TU Hamburg Harburg und Firma Künzel (FKZ 22018303 und FKZ 22018503) Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinfeuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide.....	141
4.3	Wilhelm-Klauditz-Institut Braunschweig (WKI) (FKZ 22018103) Prototypenentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW	145
4.4	atz Entwicklungszentrum Sulzbach Rosenberg (atz) (FKZ 22019303) Kleinfeuerungsanlage für Getreide und Stroh	149
4.5	Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) (FKZ 220 189 03) Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen	158
5	Schlussfolgerungen	168
6	Literaturverzeichnis.....	172
7	Anhangverzeichnis	177
8	Abbildungsverzeichnis.....	179
9	Tabellenverzeichnis.....	196
10	Abkürzungsverzeichnis.....	199

Anlagen I, II und III

1 Einleitung

Die verstärkte Nutzung nachwachsender Energieträger ist erklärtes Ziel der Europäischen Union (EU). Die Gründe, welche für den weiteren forcierten Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen sprechen, sind die Erhöhung der Versorgungssicherheit (Verminderung der Abhängigkeit von Energieimporten), die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Volkswirtschaften, die Schonung begrenzter Ressourcen sowie die Förderung einer umweltverträglichen Energieversorgung (Umwelt- und Klimaschutz). Ende des Jahres 2005 wurden ca. 8 % des europäischen Endenergieverbrauchs auf der Basis von Erneuerbaren Energien abgedeckt. Dieser Anteil soll bis 2020 auf 20 % mehr als verdoppelt werden. Dabei liegt mit mehr als 70 % der Schwerpunkt der Bereitstellung von Primärenergie aus regenerativen Energien weiterhin bei der Biomasse. Das bedeutet eine Verdreifachung des Biomasseanteiles. Um die Ziele der EU sowie der Bundesregierung zu erreichen, ist es notwendig, alle Möglichkeiten der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern auszuschöpfen. Dies betrifft, neben der Nutzung von Holz aus der Forstwirtschaft, der Holzverarbeitenden Industrie sowie dem Altholz, vor allem Haupt- und Nebenprodukte der Landwirtschaft. In der Landwirtschaft kommen als Energieträger Stroh, Ganzpflanzengetreide und Getreidekorn in Betracht. Aufgrund gesetzlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen stellte sich die Nutzung dieser Brennstoffe bisher als schwierig dar. Ein erhöhtes Interesse besteht besonders seitens der Landwirtschaft an einer energetischen Verwendung von Getreide und Getreidereststoffen in Kleinanlagen.

Für die direkte energetische Nutzung biogener Energieträger gilt das Bundesimmissionsschutzgesetz mit seinen Verordnungen. Die 1. BImSchV verweist im § 5 für Anlagen mit einer Nennwärmeleistung kleiner 15 kW auf die zugelassenen Brennstoffe nach § 3 Nr. 1-4 oder 5a. Hier werden Getreidekörner und Ölsaaten bisher nicht aufgeführt. Für Anlagen ≥ 15 kW bis < 100 kW sind die einsetzbaren Brennstoffe im § 3 Nr. 1 - 12 aufgezeigt. Speziell der Punkt Nr. 8 "Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe" ist dabei besonders relevant. Hier wird im Kommentar von Feldhaus, 1988 zur 1. BImSchV der Begriff „strohähnliche pflanzliche Stoffe" wie folgt näher erläutert: "Energiepflanzen, wie z.B. Schilf, Elefantengras, Heu, Maisspindeln" [4/].

Anlagen ab einer Nennwärmeleistung von 100 kW unterliegen der 4. BImSchV und damit den Anforderungen der TA Luft [5/]. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland ermöglichen gegenwärtig eine thermische Verwertung von Getreide erst ab diesem Leistungsbereich von 100 kW. Das bedeutet, dass für Anlagen ab 100 kW bis < 50 MW nach § 19 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren durchgeführt werden muss. Dies ist verbunden mit deutlich höheren Anforderungen hinsichtlich des Immissionsschutzes und führt neben erhöhten Investitionskosten (z.B.

Zuführungstechnik, Feuerungstechnik, Emissionsminderungstechniken, etc.) auch zu wesentlich höheren Betriebskosten (Strom, Wartung, Emissionsüberwachung, etc.) gegenüber Holzfeuerungsanlagen bzw. Öl- oder Gasfeuerungsanlagen.

Gegenwärtig befindet sich die 1. BImSchV in der Novellierung. Nach kontroverser Diskussion wurden in der bislang abschließenden Regelbrennstoffliste im § 3 Nr. 8 weitere Brennstoffe wie z.B. nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide, wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und -halmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen ergänzt. Die in § 3 Absatz 1 Nummer 8 genannten Brennstoffe - ausgenommen Stroh - dürfen nur in Betrieben der Land- und Forstwirtschaft, des Gartenbaus und in Betrieben des agrargewerblichen Sektors, die Umgang mit Getreide haben (z.B. Mühlen, Agrarhandel), eingesetzt werden. Zudem soll eine Öffnung für Nachwachsende Rohstoffe in Nr. 13 erfolgen. Gegenwärtig wurde die Neufassung am 2.7.2009 vom Bundestag beschlossen. Eine Bestätigung durch den Bundesrat und den Bundespräsidenten sowie die Notifizierung durch die EU steht jedoch noch aus und wird im Herbst dieses Jahres erwartet.

Die Verwendung von fester Biomasse als Energieträger hat sich besonders in Bezug auf die Nutzung von Holz in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt. Speziell im Bereich von Kleinf Feuerungsanlagen hat eine wesentliche Modernisierung der Anlagentechnik stattgefunden. Feuerungsanlagen für landwirtschaftliche Biobrennstoffe, wie z. B. Stroh und Getreide, werden dagegen hauptsächlich in einigen Ländern, wie z.B. Dänemark, Schweden und Österreich hergestellt und genutzt. In Deutschland spielen sie auch aufgrund rechtlicher Regelungen (z.B. Einordnung der Biomassen als Brennstoffe in den Geltungsbereich der TA-Luft für Anlagen ab 100 kW) bisher nur eine untergeordnete Rolle. Mit den sich verändernden Rahmenbedingungen wie z.B. steigende Marktpreise für fossile Energieträger, wie Heizöl und Erdgas bzw. fallenden Getreidepreisen werden besonders landwirtschaftliche Haupt- und Nebenprodukte in Bezug auf eine energetische Verwertung interessant. Aufgrund der unterschiedlichen physikalisch-mechanischen und chemisch-stofflichen Eigenschaften von landwirtschaftlichen Biomassen sind jedoch brennstoffspezifische Feuerungsanlagen notwendig, um den speziellen Brennstoffen gerecht zu werden.

1.1 Zielsetzung des Projektes

Das erste Ziel des Projektes war es, als stroh- bzw. getreidetauglich ausgewiesene bestehende Praxisanlagen verschiedener Hersteller hinsichtlich ihres Emissionsniveaus und ihrer technischen Betriebssicherheit im Praxisbetrieb zu prüfen. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Strohfeuerungsanlagen im Leistungsbereich < 1 MW.

Des Weiteren sollten speziell entwickelte Abscheidetechniken zur Minimierung der Staubkonzentration an verschiedenen Anlagen getestet werden. Dies betraf, neben neuartigen preiswerteren Filtertechnologien für bestehende Strohfeuerungsanlagen, auch ausgewiesene Getreidefeuerungsanlagen, da hier bisher ein Haupthinderungsgrund für den verbreiteten Einsatz derartiger Anlagen besteht.

Der dritte Schwerpunkt lag bei der Begleitung, Erfassung und Gesamtauswertung der im Rahmen des FNR-Forschungsschwerpunktes „Energetische Nutzung von festen Bioenergieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen außer Holz sowie Felduntersuchungen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen kleiner 1 MWth“ geförderten Projekte.

Der Nachweis der Genehmigungsfähigkeit der am Markt angebotenen bzw. in der Entwicklung befindlichen Feuerungsanlagen für den Einsatz von Halmgut im Bereich der 1. bzw. 4. BImSchV war das zentrale Ziel dieser Projekte.

1.2 Projektpartner

Zur Umsetzung der Zielsetzung für das Projekt der TLL wurden der langjährige Kooperationspartner, die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG), insbesondere das Referat 43 – Emissionsschutz und als Unterauftragnehmer das Institut für Luft und Kältetechnik (ILK) gewonnen, um die entsprechenden qualitätsgerechten Messungen der Emissionsparameter an den einzelnen Praxisanlagen vorzunehmen [1/]. Das ILK war außerdem der Partner für den Forschungs- und Entwicklungsansatz des Projektes für den Bereich Entwicklung und Erprobung von geeigneten Staubabscheidetechniken.

Für die Umsetzung des dritten Schwerpunktes erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der FNR sowie den Bearbeitern der im Rahmen des FNR-Forschungsschwerpunktes bewilligten zehn Projekte. Einen vollständigen Überblick über die Zuwendungsempfänger, die Projektthemen und Projektziele sowie die Art der Projekte gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der geförderten Projekte im Rahmen des Förderschwerpunktes „Energetische Nutzung von Getreide und halmgutartigen Biobrennstoffen“ von BMELV/FNR (Bekanntmachung vom 16.05.2003)

Nr.	FKZ	Projekt – Thema	Zuwendungs- empfänger	Projektziele	Anlagentyp/ Leistungsklasse	Projekt- typ*
1	03NR176 22017603	Weiterentwicklung einer Feuerungsanlage für die Nutzung fester Bioenergieträger mit dem Schwerpunkt Staubreduzierung durch Einsatz eines Elektrofilters	DEULA Schleswig-Holstein GmbH, Lehranstalt für Agrar- und Umwelttechnik (DEULA)	Weiterentwicklung einer Feuerungsanlage für die Nutzung fester Bioenergieträger mit dem Schwerpunkt Staubreduzierung durch Einsatz eines Elektrofilters	REKA-HKRST 100 98 kW _{th}	FT
2	03NR179 22017903	Entwicklung einer Low-NOx – Feuerung zur Verbrennung von Getreide und halmgutartigen Bioenergieträgern nach dem FLOX – Prinzip	Fachhochschule Bingen (FH B)	Entwicklung neuartiger KFA zur Vermeidung von Emissionen und Betriebsstörungen durch Schlackebildung -FLOX-Verbrennung	Neuentwicklung FLOX Brenner < 50 kW _{th}	FuE p. T.
3	03NR180 22018003	Untersuchungen zum Emissionsverhalten von getreide- und halmgutartigen Feuerungsanlagen in der Praxis	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)	Feldversuch zur Wärmebereitstellung aus Getreide (Korn, Stroh, Ganzpflanze) mit Praxisanlagen verschiedener Hersteller sowie Entwicklung innovativer Filtertechnik	REKA-HKRST 30 / 60 30 kW _{th} / 60 kW _{th} Agroflam Agro 40 40 kW _{th} Linka – LINKA-H 400 400 kW _{th} Herlt – HSV 145 145 kW _{th}	FT FuE s. T.
4	03NR181 22018103	Prototypentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW	Fraunhofer-Institut für Holzforschung – Wilhelm-Klauditz-Institut Braunschweig (WKI)	Entwicklung eines Feuerungsprototyps mit einer Leistung unter 1 MW, Feldmessungen an Feuerungen, Primärmaßnahmen zur Verbesserung des Ausbrandes sowie zur Vermeidung von Schlackebildung	Neuentwicklung KFA < 1.000 kW _{th}	FuE p. T.
5	03NR183 22018303	Verbundprojekt: Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinferungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide	Technische Universität Hamburg-Harburg (TU HH)	Optimierung einer Kleinferungsanlage (KFA) für die Nutzung von Getreidekörnern (GK) und Strohpellets (SP) - Verbundprojekt I	Optimierung KFA < 50 kW _{th}	FuE p. T.
6	03NR185 22018503	Verbundprojekt: Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinferungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide	Paul Künzel GmbH	Optimierung einer Kleinferungsanlage (KFA) für die Nutzung von Getreidekörnern (GK) und Strohpellets (SP) - Verbundprojekt II	Optimierung KFA < 50 kW _{th} (siehe auch 03NR183)	FuE p. T.

7	03NR189 22018903	Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh - Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen	Universität Stuttgart (IVD)	Entwicklung neuartiger KFA mit Optimierung und Verbesserung des Betriebs- und Emissionsverhaltens von Getreidefeuerungsanlagen	Agroflamm Agro 40 - 40 kW _{th} Guntamatic Powercorn 30 - 30 kW _{th}	FuE p. T. PU
8	03NR192 22019203	Messung an kleinen Feuerungsanlagen zur Verbrennung von Stroh-Pellets bzw Getreide (<150 kW _{th})	Fachhochschule Köln (FH Köln)	Feldversuche mit KFA für Stroh und Getreide der Firmen Passat Energy, Gerlinger, Baxi, Ökotherm, Agroflamm, Heizomat, Guntamatic	Ökotherm C1L 120 kW _{th} Passat Energy C4 40 kW _{th} Agroflamm Agro 40 40 kW _{th} Guntamatic Powercorn 30 30 kW _{th} Biokompakt AWK 45 SI 45 kW _{th} Heizomat HSK-RA 60 60 kW _{th}	FT TU
9	03NR193 22019303	Kleinfeuerungsanlage für Getreide und Stroh	atz Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg	Entwicklung neuartiger KFA mit innovativer leistungsfähiger Filtertechnik	Neuentwicklung KFA Bereich 50 kW _{th}	FuE p. T. FuE s. T.
10	03NR194 22019403	Felduntersuchung des Biokompakt®-AWK 45 SI“ zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen <1 MW _{th} , Standort Bernburg	Forschungs- und Beratungszentrum für Maschinen- und Energiesysteme e.V. (FBZ)	Feldversuch mit dem Vergaserkessel Biokompakt®-AWK 45 SI über zwei Heizperioden, Grundlage für eine genehmigungsrechtliche Beurteilung	Biokompakt AWK 45 SI 45 kW _{th}	FT

*FT – Feldtests; TU – Technikumsuntersuchungen; PU – Prüfstandsuntersuchungen;

*FuE p. T. - Entwicklung neuartiger primärer Technologien; FuE s. T. - Entwicklung neuartiger sekundärer Technologien

1.3 Arbeitsplan

Arbeitspaket 1: Durchführung von Feldtests zur Bestimmung des Emissionsverhaltens von Anlagen zur Stroh-, Strohpellet- und Getreideverbrennung

Dazu sollten Anlagen in zwei unterschiedlichen Leistungsbereichen (kleiner und größer 100 kW) untersucht werden mit dem Schwerpunkt der Untersuchungen bei Praxisanlagen zur Stroh-, Strohpellet- und Getreideverbrennung. Unter Strohverbrennungsanlagen werden in diesem Fall Anlagen verstanden, die mit preiswerterem losem Stroh (Häcksel, Ballen) arbeiten. Von den ca. 30 europäischen Herstellern, die getreide- bzw. stroh- oder strohpellettaugliche Anlagen anbieten, sind in Deutschland etwa 15 Firmen mit Praxisanlagen vertreten [2/, 3/]. Diese werden meist mit zugelassenen Brennstoffen, wie Holzhackschnitzel und / oder Holzpellets betrieben.

Im vorliegenden Projekt sollte geprüft werden, inwieweit diese Anlagen die nach dem gegenwärtigen Bundesimmissionsschutzgesetz und deren Verordnungen (1. BImSchV, TA-Luft [4/, 5/]) geforderten Grenzwerte einhalten. Für das TLL Projekt wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Anlagen-, Brennstoffe und Untersuchungen von Abscheidetechniken vorgesehen.

Tabelle 2: Übersicht des Untersuchungsprogrammes des Projektes der TLL

Anlagentyp / Leistung	Körner	Stroh-pellets	Sonstige Halmgutpellets	Stroh Häcksel / Ballen	Einsatz neuartiger Filtertechnologie
Reka-G – 30 kW	X	X	X	-	X
Reka-S – 60 kW	-	-	-	X	X
Herlt – 145 kW	-	-	-	X	-
Linka – 400 kW	-	-	-	X	X
Heizomat – 400 kW*	X	X	X	-	-

* Alternative bzw. ergänzende Untersuchungen am Agro 40, IHT GE 30, Schmid UTSW 360

In Abstimmung mit der FNR und einzelner Projektteilnehmer erfolgte eine Modifizierung der zu untersuchenden Anlagentechnologien sowie der Brennstoffe (vgl. Tab. 3 und 4). Für das Projekt der TLL ergab sich im Wesentlichen nur eine Änderung für die geplante zu untersuchende 400 kW Anlage der Firma Heizomat.

Untersucht wurden im einzelnen:

A Getreidetaugliche Feuerungsanlage im Größenbereich < 100 kW

Untersucht wurde ein Kessel der Firma Reka (Typ HKRST 30/3) mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW am Standort Zottelstedt. Es erfolgten weiterhin Untersuchungen und die Entwicklung sowie Integrierung eines Elektrofilters durch das ILK.

B Strohtaugliche Feuerungsanlage im Größenbereich < 100 kW

Der zu untersuchende Kessel stammt von der Firma Reka (Typ HKRST 60) mit einer Nennwärmeleistung von 56 kW. Diese Anlage ist mit einem Reka-Ballenteiler für die Auflösung der Strohballen ausgerüstet. Es erfolgten weiterhin Untersuchungen und die Entwicklung sowie Integrierung eines Schütttschichtfilters durch das ILK.

C Halmgutfeuerungsanlagen im Größenbereich zwischen 100 kW und 1 MW

In diesem Leistungsbereich sollten zwei Anlagen untersucht werden, der Strohballenvergaser der Firma Herlt aus Vielitz am Standort Wildenfels in Sachsen mit einer Nennwärmeleistung von 145 kW und eine 400 kW Anlage der Firma LINKA.

Da der Strohballenvergaser am Standort Wiesenburg in Sachsen bereits von der Sächsischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (SLUG) bzw. der Fachhochschule Zwickau sowie dem Staatlichen Umweltfachamt Plauen emissionsseitig ausreichend untersucht wurde, wurden nach Absprache, die vorhandenen Ergebnisse mit in die Auswertung einbezogen [6/, /7/, /8/].

Aufgrund des modifizierten Untersuchungsprogrammes erfolgten weitere Messungen an der im Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut (TLPVG) etablierten Feuerungstechnologie (Agro 40) sowie im Rahmen der Erneuerung der Heizanlage am Standort des Thüringer Zentrums für nachwachsende Rohstoffe (TZNR) in Dornburg an einer Vorschubtreppenrostfeuerung (UTSW 360) sowie einer Unterschubfeuerung (IHT GE 30).

Arbeitspaket 2: Entwicklung, Erprobung, Anpassung und Optimierung geeigneter neuer kostengünstiger Staubabscheidetechniken für Getreide- und Strohfeuerungsanlagen

Ausgehend von den inhaltlichen und finanziellen Verschiebungen, welche sich im Zuge der Bewilligung und Durchführung des Vorhabens ergaben, wurden folgende Arbeitsschwerpunkte bearbeitet [1/]:

- Ergänzende Recherche zu Abscheidetechniken und Schadstoffmessungen bei Feuerungsanlagen mit biogenen Brennstoffen (außer Holz)
- Konzeption der Filtertechnik 1 für die Anlage 30 kW
- Konstruktion und Fertigung der Filtertechnik 1 für die Anlage 30 kW
- Voruntersuchungen an den gefertigten Abscheidern, Inbetriebnahme und Erstuntersuchung
- Untersuchung der Filtertechnik 1 für die Anlage 30 kW, Bestimmung der roh- und reingasseitigen Emissionen (einschl. PCDD/F, etc.)
- Messung der Rohgasparameter an Anlage 2; Festlegung, Konzeption, Konstruktion der einzusetzenden Filtertechnik für Anlage 60 kW
- Fertigung / Inbetriebnahme Filtertechnik 2 (Anlage 60 kW)
- Untersuchung der Filtertechnik 2 für die Anlage 60 kW, Bestimmung der roh- und reingasseitigen Emissionen (einschl. PCDD/F, etc.)

- Erprobung vorhandener Filteranlage an 400 kW Strohfeuerung, Untersuchung der Filtertechnik 3 für die Anlage 400 kW, Bestimmung der roh- und reingasseitigen Emissionen (einschl. PCDD/F, etc.)
- Auswertung der Ergebnisse, Berichtsfassung

Die Veränderungen gegenüber dem Antrag betrafen insbesondere die installierten Kessel und deren Feuerungsleistung sowie die dritte Filtertechnik. Diese konnte im Rahmen des reduzierten Projektumfangs nicht verbessert werden.

Arbeitspaket 3: Begleitung, Auswertung und Analyse der Gesamtergebnisse der im Rahmen der Bekanntmachung der FNR bewilligten Projekte

Der TLL oblag die gesamten Brennstofflogistik und – analyse der Referenzbrennstoffe. Auch die abschließende Auswertung auf Basis der Abschlußberichte [/1/, /3/ und /9/ bis /20/] der einzelnen Parameter des Arbeitspaketes war Aufgabe der TLL. Dabei muss unterschieden werden in Projekte mit Feld-, Technikums- bzw. Prüfstandsuntersuchungen und in Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Die geplanten und durchgeführten Untersuchungen der einzelnen Projekte mit Feld-, Technikums- bzw. Prüfstandsuntersuchungen bzw. zu den einzelnen Referenzbrennstoffen sind in den Tabellen 3 und 4 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Feuerungsanlagen und Brennstoffe im Rahmen von Feldtests, Technikums- bzw. Prüfstandsuntersuchungen

Nr.	FKZ	Institution	Feuerungsprinzip	Anlagentyp	NWL [kW _{th}]	Brennstoffe				
						Körner		Stroh		Sonstige
						WW (RB)	WG (RB)	WWSP / WWSH (RB)	WRSP (RB)	
1	03NR176	DEULA	Vorschubtreppenrostfeuerung	Reka HKRST 100	98	X	X	X	X	X
3	03NR180	TLL (ILK/TLUG)	Vorschubtreppenrostfeuerung	Reka HKRST 30	30	X	X	X	X	X X X X X
			Vorschubtreppenrostfeuerung	Reka HKRST 60	60			X		
			Unterschubfeuerung	Agro 40	40	X	X	X	X	
			Brennmuldenfeuerung	Linka H 400	400					
			Ganzballenvergaser	HSV 145	145					
			Unterschubfeuerung	IHT GE 30	30			X	X	
			Vorschubtreppenrostfeuerung	UTSW 360	360			X		
7	03NR189	IVD	Unterschubfeuerung	Agro 40	40	X	X	X	X	X
		TFZ	Treppenrostfeuerung *	Powercorn 30	30	X	X	X	X	X
8	03NR192	FH Köln (Weßling Laboratorien GmbH)	Brennmuldenfeuerung	Ökotherm C1L	120	X	X	X	X	X X
			Brennmuldenfeuerung *	Passat C4	40			X		
			Unterschubfeuerung	Agro 40	40	X	X	X	X	
			Treppenrostfeuerung	Powercorn 30	30					
			Unterschubfeuerung	AWK SI 45	45					
			Kettenumlaufrost	RHK-AK 60	60					
10	03NR194	FBZ (LAU)	Unterschubfeuerung	AWK SI 45	45	X	X			X

* PU – Prüfstandsuntersuchungen

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Emissionsparameter in den einzelnen Feuerungsanlagen mit Referenzbrennstoffen bzw. in reinen Strohfeuerungsanlagen

Brennstoff	Institution	Anlage	NWL [kW]	CO	NO _x	SO ₂	Cges	N ₂ O	Gesamtstaub	Feinstaub	HCl	PCDD/F	PAK	Benzo(a)pyren	BTX	Benzol	PCB
Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB)																	
WW RB	TLL / ILK	Reka HKRST 30	30	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		
	TLL / TLUG	Agro 40	40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	DEULA	Reka HKRST 100	98	X	(X)*				X								
	FBZ / LAU	AWK SI 45	45	X	X	(X)*			X	X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (TL)		X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (VL/TL)
	FH Köln	Agro 40	40	X	X				X								
	FH Köln	Passat C4	40	X	X				X								
	FH Köln / WLG	Heizomat RHK-AK 60	60	X	X	(X)*	(X)*	(X)*	X		X	X				X	
	TFZ	Powercorn 30	30	X	X				X		X						
Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB)																	
WG RB	TLL / ILK	Reka HKRST 30	30	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		
	TLL / TLUG	Agro 40	40	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X		
	DEULA	Reka HKRST 100	98	X	(X)*				X								
	FBZ / LAU	AWK SI 45	45	X	X	(X)*	(X)*		X	X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (VL/TL)		X (VL/TL)	X (VL/TL)	X (VL/TL)
	FH Köln	Agro 40	40	X	X				X								
	FH Köln	Passat C4	40	X	X				X								
	FH Köln / WLG	Heizomat RHK-AK 60	60	X	X	(X)*	(X)*	(X)*	X		X	X	X			X	
	FH Köln	Powercorn 30	30	X	X				X								
	TFZ	Powercorn 30	30	X	X				X		X						
Referenzbrennstoff Winterweizenstrohpellets bzw. -häcksel (WWSP bzw. WWSH RB), 6 mm Durchmesser																	
WWSP RB	TLL / ILK	Reka HKRST 30	30	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			
	TLL / TLUG	Agro 40	40	X	X	X	X		X		X						
	TLL / ILK	Reka HKRST 60	60	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			
	DEULA SH	Reka HKRST 100	98	X	X				X								
	FH Köln	Agro 40	40	X	X				X								
	FH Köln / WLG	Heizomat RHK-AK 60	60	X	X	(X)*	(X)*	(X)*	X		X	X	X			X	
	FH Köln	Ökotherm C1L	120	X	X				X								
Referenzbrennstoff Winterroggenstrohpellets (WRSP RB), 6 mm Durchmesser																	
WRSP RB	TLL	Reka HKRST 30	30	X	X	X	X	X	X		X						
	DEULA SH	Reka HKRST 100	98	X	X				X								
	FH Köln	Agro 40	40	X	X				X								
	FH Köln / WLG	Heizomat RHK-AK 60	60	X	X				X								
	FH Köln	Ökotherm C1L	120	X	X				X								
	TFZ	Powercorn 30	30	X	X				X		X						
Weizenstroh	TLL / UBG	HSV 145	145	X	X		X		X		X						
Triticalestroh	TLL / ILK	H 400	400	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			
Weizenstroh	TLL / ILK	H 401	400	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			
* Werte nur im speziellen Projektabschlussbericht enthalten									Versuche mit Referenzbrennstoffen								
VL/TL Vollast/Teillast									Versuche ohne Referenzbrennstoffen								

1.4 Methodik

1.4.1 Analytik der Brennstoffe

Neben der zentralen Bereitstellung der Referenzbrennstoffe wurde die einheitliche Analyse der Brennstoffe aller Versuche in einem Labor als unbedingt notwendig erachtet. Die dabei verwendeten Parameter und Verfahren sowie die dazugehörigen Normen sind in Anlage I aufgeführt. Die für die unterschiedlichen Projekte analysierten und in Feuerungsanlagen getesteten Brennstoffe können so hinsichtlich ihres Emissionspotenzials miteinander besser verglichen werden. Aus diesem Grund wurden die Referenzbrennstoffe auch zentral von der TLL organisiert, teilweise eingelagert, analysiert bzw. nach Bedarf den Partnern ausgeliefert. Die Darstellung der Analyseergebnisse der Brennstoffe erfolgt im Kapitel 2.3.

1.4.2 Analytik der Emissionsparameter

Um die Ergebnisse der Messungen der einzelnen Emissionsparameter ebenfalls hinreichend vergleichbar zu machen, wurde in Abstimmung mit der TLUG bzw. dem ILK, dem TFZ und IVD sowie der FNR eine Messanleitung für alle Partner ausgearbeitet, die festlegt, welche Daten bei den Versuchen aufzunehmen sind. Des Weiteren wurden Hinweise zur Durchführung und der Art der Messungen sowie zur Ergebnisaufarbeitung aufgeführt (s. Anlage II). Die einzelnen Projektpartner haben die von ihnen tatsächlich verwendeten Messverfahren in ihren Projektabschlußberichten ausführlich beschrieben, sodass in diesem Abschlußbericht lediglich die Verfahren und der Messaufbau des Kooperationspartners der TLL, der TLUG, in Anlage III näher beschrieben werden.

Neben der Bestimmung der allgemeinen Abgasrandbedingungen (Abgasvolumenstrom, Abgastemperatur, Restsauerstoffgehalt, etc.) erfolgte im Wesentlichen die kontinuierliche bzw. diskontinuierliche Bestimmung folgender Rauchgaskomponenten (s. Tab. 5).

Tabelle 5: Überblick der erfassten Emissionsparameter

Kontinuierlich	Diskontinuierlich
Kohlenmonoxid	Gesamtstaub im Rohgas
Stickoxide	Gesamtstaub im Reingas ¹⁾
Distickoxid	Chlorwasserstoff ²⁾
Schwefeloxide	PCDD/F
Gesamtorganischer Kohlenstoff	
Chlorwasserstoff	

¹⁾ bei vorhandener Filtertechnik ²⁾ Chlorwasserstoffbestimmung erfolgte teilweise kontinuierlich

Darüber hinaus sollten, aufgrund der besonders gesundheitsgefährdenden Eigenschaften sowie der hierzu bislang nur ungenügend vorliegenden Daten folgende Emissionskomponenten mit in das Messprogramm einbezogen werden:

Benzol, PAK bzw. Benzo(a)pyren und Feinstaub (PM 10 / ggf. PM 2,5)

Aufgrund des technischen als auch finanziellen Aufwandes solcher Messkampagnen konnte die Bestimmung bestimmter Komponenten jedoch nur für ausgewählte Brennstoffe (Referenzbrennstoffe) bzw. Anlagen erfolgen.

Um eine effiziente und weitestgehend vergleichbare Darstellung der Emissionsergebnisse zu erreichen, wurde durch die TLL eine gezielte Ergebnisabfrage bei den einzelnen Projektnehmern durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3 vorgestellt.

2.1 Beschreibung der untersuchten Feuerungsanlagen

Die Auswahl der in den einzelnen Projekten untersuchten Feuerungsanlagen wurde im Rahmen der Projektantragstellung von jedem Partner selbst vorgenommen. Dabei wurde ihre generelle Eignung für den Einsatz von halmgutartigen Brennstoffen (Getreidekörner bzw. Stroh) auf Basis der Herstellererklärungen als notwendig vorausgesetzt.

Die einzelnen Feuerungsversuche, Analysemethoden bzw. zu untersuchenden Brennstoffe, welche für einen Anlagenvergleich vorgesehen waren, führten in Abstimmung der Projektkoordinatoren (FNR/TLL) und einzelner Projektnehmer zu geringfügigen Veränderungen in den einzelnen Arbeitsprogrammen. Das betraf insbesondere die Untersuchungen der Referenzbrennstoffe bzw. die Untersuchungen bestimmter Anlagentechnologien mit Messstellen nach § 26 BImSchG oder vergleichbaren Institutionen. Tabelle 3 und 4 geben einen Überblick über die 17 im Rahmen der Projekte untersuchten Anlagen mit 9 unterschiedlichen Technologien, welche in Praxistests bzw. mit Referenzbrennstoffen untersucht wurden. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

Anlagentechnologie 1: Vorschubtreppenrostfeuerung der Firma REKA A/S (Dänemark)

Anlagentypen: HKRST 30/3, HKRST 60/3, HKRST 100 (Feldtests TLL/ILK und DEULA)

Die drei untersuchten Kessel vom Typ HKRST der dänischen Firma REKA A/S mit einer NWL für Halmgüter von 30 kW (TLL/ILK – Standort Zottelstedt, s. Abb. 1), 54 kW (TLL/ILK – Standort Dobia, s. Abb. 2) und 98 kW (DEULA – Standort Rendsburg, s. Abb. 4) für halmgutartige Brennstoffe sind leistungsgrößenunabhängige Quereinschubfeuerungen mit Schneckenzuführungen, beweglichem Vorschubtreppenrost und wassergekühlter, feuerfester Auskleidung des Feuerungsraumes sowie einem halbautomatischen Ascheaustrag.



Abbildung 1: Blick in den Feuerraum und Wärmetauscher (links), Gesamtanlage (mitte), Primär- und Sekundärluftzufuhr (rechts) beim HKRST 30/3

Die Brennstoffzufuhr erfolgt aus den Vorratsbehältern bzw. -bahnen über Schneckenzuführungen, Zellenradschleusen und Stokerschnecken (s. Abb. 2).



Abbildung 2: Anlagenkonzept der Strohballenauflöser-Quereinschubfeuerung HKRST 60/3

Die Anlage am Standort Dobia verfügt zusätzlich über einen vorgelagerten stationären Strohballenauflöser mit Strohauflegebahn (s. Abb. 3).



Abbildung 3: Strohballenauflöser mit Strohauflegebahn am HKRST 60/3

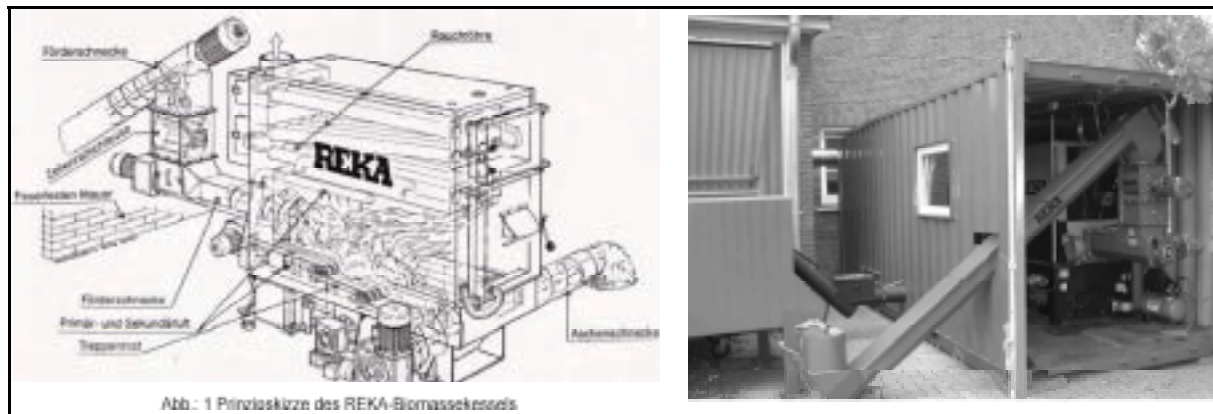


Abbildung 4: Funktionsschema (links, Quelle: Werksprospekt) und Containeranlage HKRST 100 (rechts, Quelle: /9/)

Die erforderliche Verbrennungsluft wird den Feuerräumen gestuft als Primär- und Sekundärluft zugeführt. Die Zuführung der Primärluft erfolgt dabei über im Treppenrost befindliche Luftöffnungen und die Zuführung der Sekundärluft über Düsenlanzen. Letztere unterscheiden sich konstruktiv zwischen den einzelnen Baugrößen (s. Abb. 5).



Abbildung 5: Zuführung der Sekundärluft über Düsenlanzen (links: HKRST 100; rechts: HKRST 30/3)

Da aufgrund von Voruntersuchungen eine Überschreitung der geltenden Staubemissionswerte zu erwarten war /2/, erfolgte für die Anlagen die Entwicklung sowie Integrierung von Abscheidesystemen (s. Abb. 6 bis 8, Quellen /1/ und /9/)). Für alle drei Anlagen wurden Elektrofiltersysteme bzw. (Prototypen) untersucht. Für die Anlage HKRST 60 wurde letztendlich ein Schütttschichtfilter umgesetzt.



Abbildung 6: Abscheideeinrichtungen HKRST 30/3 (links) sowie HKRST 60/3 (rechts)

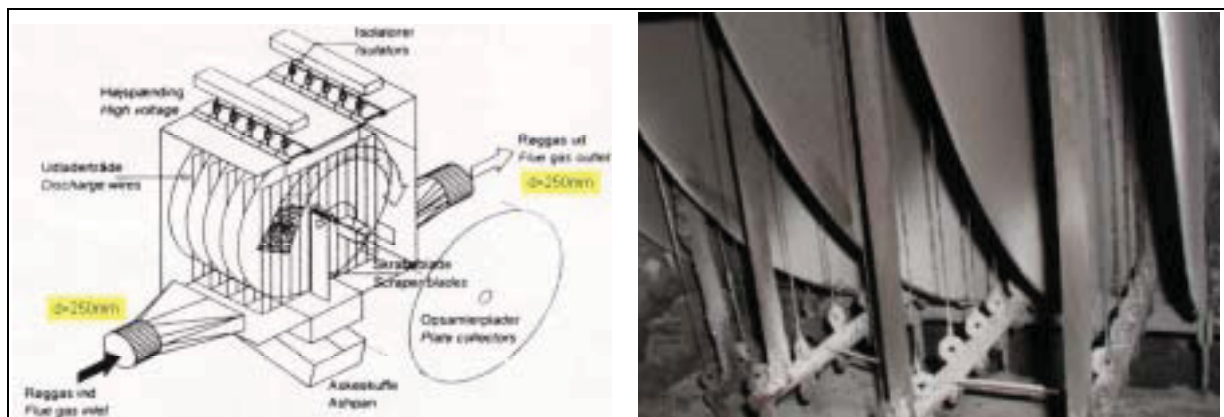


Abbildung 7: Getesteter Reka-Elektrofilter (Schema: links) an der DEULA am HKRST 100 (rechts)

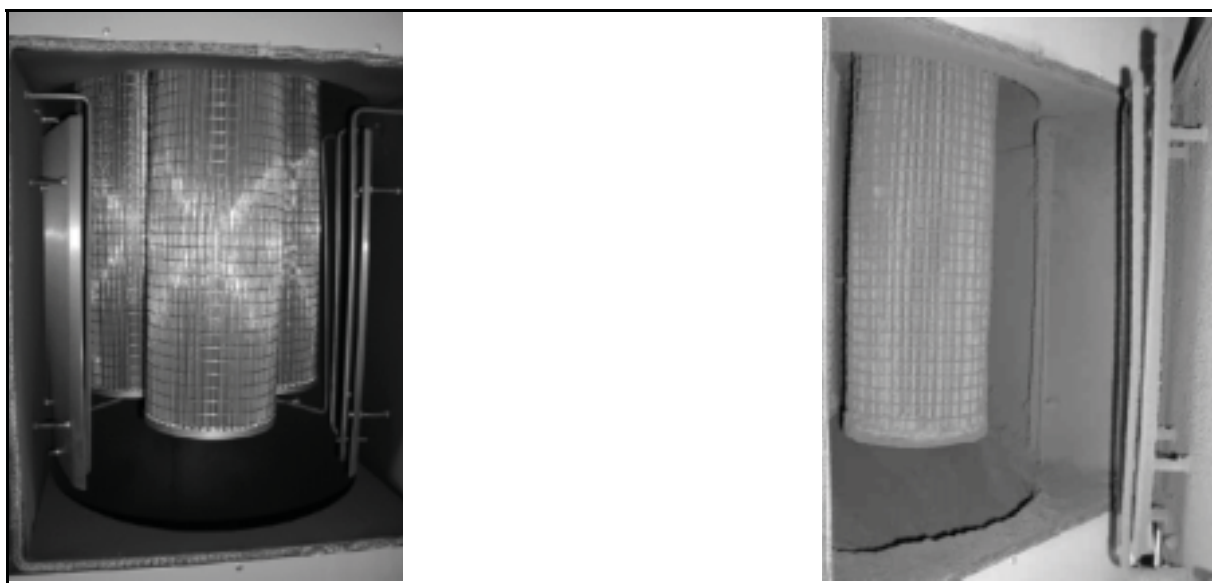


Abbildung 8: Getesteter Metallgewebefilter (Firma Oskar Winkel) der DEULA am HKRST 100

Anlagentechnologie 2: Unterschubfeuerung der Firma Agroflam (Deutschland)

Anlagentyp: Agro 40 (Feldtests TLL/ILK und FH Köln, Prüfstandsuntersuchungen IVD/TFZ)

Die drei untersuchten Feuerungsanlagen mit Anlagentechnologie des Agro 40 mit einer angegebenen NWL von 40 kW bei Einsatz von Getreide und Strohpellets (für Holzpellets liegt die NWL bei 50 kW) gehören zu den Unterschubfeuerungen. Diese zweistufige Verbrennungstechnologie wurde speziell für die Verwendung von halmgutartigen Brennstoffen entwickelt. Der Brennstoff wird über eine Schnecke dem Brennteller aus Siliziumkeramik zugeführt und mittels einer Heißluftpistole automatisch gezündet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Unterschubfeuerungen wird die Primärluft über einen Luftdüsenring von oben auf den Brennstoff geführt, welcher durch ein Bewegungselement auf dem Brennteller verbreitet wird. Durch nachgeführten Brennstoff werden die zunehmend getrockneten und entgasten Brennstoffe nach und nach an den Rand des Brenntellers befördert. Der entstehende Biomassekoks wird über den Rand des Brenntellers hinaus über eine Fallstufe in den darunter befindlichen Koksabgasungsraum befördert. Dort findet räumlich getrennt vom eigentlichen Verbrennungsvorgang die Konversion des Restkohlenstoffes statt. Die CO-haltigen Verbrennungsgase steigen dabei nach oben in das Flammrohr und vermischen sich mit den Verbrennungsgasen der ersten Stufe. Ein weiteres Bewegungselement im unteren Bereich der Feuerungsanlage sowie ein weitestgehender Luftabschluß verhindern eine Verschlackung der Aschen und ermöglichen einen automatischen Austrag derselben. Die Verbrennung der Gasbestandteile erfolgt in einem über dem Brennteller angeordneten Flammrohr aus Siliziumkeramik. Dieses mündet in einer Ausbrandglocke. Nach dem die Rauchgase die Ausbrandglocke verlassen haben, werden sie dreifach umgelenkt und gelangen in den Wärmetauscher, in welchem sie die Wärmeenergie an das Heizsystem abgeben. Die Rauchgase werden dabei auf eine Austrittstemperatur von circa 130 - 150 °C abgekühlt (s. Abb. 9).



Abbildung 9: Funktionsschema (links), Brennraumkammer (mitte), Agro 40 (rechts)

Anlagentechnologie 3: Rostfeuerung der Firma Guntamatic (Österreich)

Anlagentyp: Powercorn 7 - 30 (Feldtests FH Köln / TLL, Prüfstandtests IVD/TFZ)

Der vom TFZ bzw. der FH Köln unter Prüfstands- bzw. Praxisbedingungen untersuchte Powercorn 7-30 ist eine speziell für Getreidekörner (Gerste, Triticale) entwickelte Kleinfeuerungsanlage (s. Abb. 10). Die NWL für diese Quereinschubfeuerung mit selbstreinigendem Treppenrost liegt bei Holzpellets im Bereich von 7 – 30 kW und bei Getreidekorn von 7 – 25 kW. Nach dem Eintrag des Brennstoffes durch eine Stokereinheit wird dieser automatisch mittels Heißluftpistole gezündet. Ein beweglicher Treppenrost gewährleistet eine automatische Rostreinigung und sichert eine notwendige Bewegung im Glutbett und den Abtransport anfallender Aschen. Die Verbrennungsluft wird über ein Gebläse eingetragen und in Primär- und Sekundärluft durch eine manuell verstellbare Klappe aufgeteilt. Dabei strömt die Primärluft durch Öffnungen im Treppenrost von unten in das Glutbett. Diese Öffnungen werden bei jeder Bewegung des Treppenrostes durch Metaldorne gereinigt. Die Sekundärluft wird in die Ausbrandzone oberhalb des Glutbettes eingeblasen. Nach einer Umlenkung der heißen Abgase durchströmen sie die Rohrbündelwärmetauscher und geben hier die Wärmeenergie an das Heizsystem ab. In den Rohrbündelwärmetauschern befinden sich Wirbulatorien, die durch eine langsame motorbetriebene Auf- und Abbewegung eine Reinigung bewirken. Eine ebenfalls langsam laufende Ascheschnecke transportiert die Rostasche in einen Aschkasten. Die Anlage verfügt über eine elektronische Regelung mit Lambdasonde.



Abbildung 10: Funktionsschema (links), Feuerraum mit Treppenrost (mitte), Powercorn 30 (rechts)

Anlagentechnologie 4: Schubbodenfeuerung der Firma Passat Energi A/S (Dänemark)

Anlagentyp: Compact C4 (Prüfstandsuntersuchungen FH Köln)

Der an der FH Köln vorhandene Kessel des Typs C4 der Fa. Passat Energi A/S hat eine NWL von 36 kW für Getreide und Holzhackschnitzel (bei Holzpellets 42 KW) und wird dort ausschließlich für feuerungstechnische Untersuchungen eingesetzt (s. Abb. 11). Die einzügige Quereinschubfeuerung befördert mittels eines mechanischen Schubsystems den Brennstoff aus dem Magazin in den nicht wassergekühlten Brennraum (s. Abb. 12). Zur Vermeidung von Schlackebildung wird laut Hersteller die Primärluft von unten in das Glutbett eingetragen, die Sekundärluft gelangt von hinten in den Brennraum. Die bei der Verbrennung anfallende Asche wird durch die Nachführung des Brennstoffs über eine nach oben gewölbte Kante des Brennrostes in den Aschekasten geschoben. Die Reinigung der in den Rauchrohren befindlichen Turbolatoren erfolgt genau wie die Entaschung manuell.

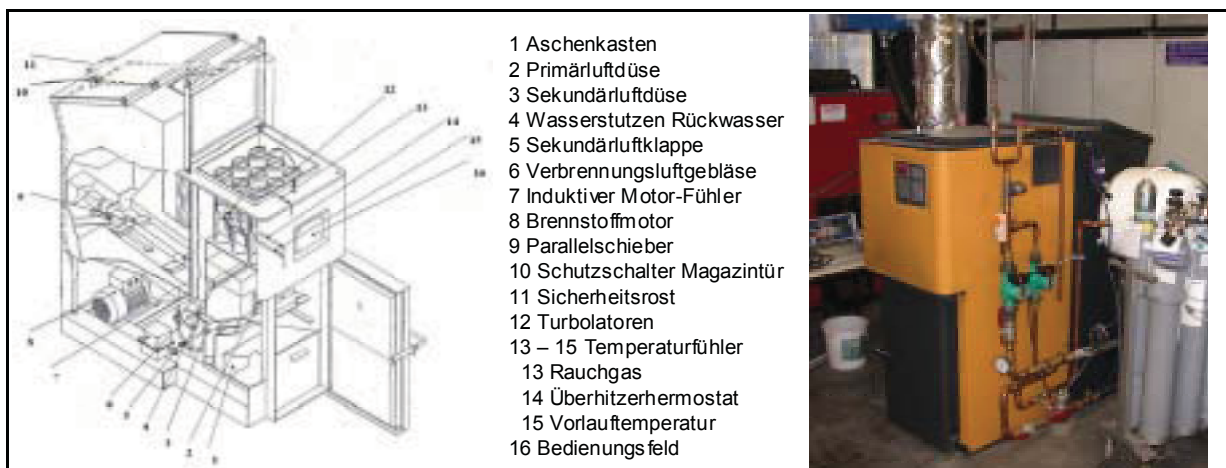


Abbildung 11: Funktionsschema (links), Compact C4 auf Prüfstand der FH Köln (rechts, Quelle /10/)



Abbildung 12: Einzügige Quereinschubfeuerung (links), Brennraum Compact C4 (rechts, Quelle /10/)

Anlagentechnologie 5: Kettenumlaufrostfeuerung der Firma Heizomat (Deutschland)

Anlagentyp: RHK – AK 60 (Feldtests FH Köln)

Der RHK-AK 60 der Firma Heizomat mit einer NWL von 60 KW für holzartige Brennstoffe wurde durch die FH Köln am Standort der Döpik Umwelttechnik GmbH emissionstechnisch untersucht (s. Abb. 13).

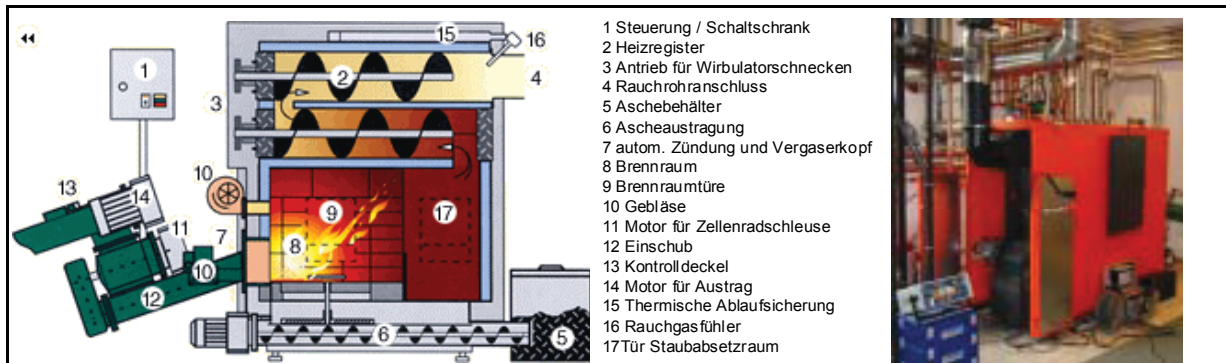


Abbildung 13: Funktionsschema (links), RHK – AK 60 bei Döpik Umwelttechnik (rechts, Quelle /10/)

Nach Herstellerangaben ist die Quereinschubfeuerung auch für halmgutartige Brennstoffe geeignet. Die Feuerungsanlage ist mit einer Riegel-Ketten-Entaschung ausgestattet (s. Abb. 14), die Asche bzw. auftretende Verschlackungen aus dem Brennraum in den Aschekasten austrägt. Der Brennstoff wird von hinten über eine Förderschnecke direkt in den Brennraum transportiert, durch die Primärluft vergast und anschließend mit der Sekundärluft verbrannt. Zur Förderung der Primär- und Sekundärluft wird jeweils ein Gebläse eingesetzt. Nach Verbrennung der Brenngase werden die Rauchgase über liegende Rauchzüge, an denen die Wärmeenergie an das Heizsystem übergeht, durch den Saugzugventilator in den Kamin abgeleitet. Die Rauchzüge werden durch elektrisch angetriebene Wirbulatoren gereinigt.

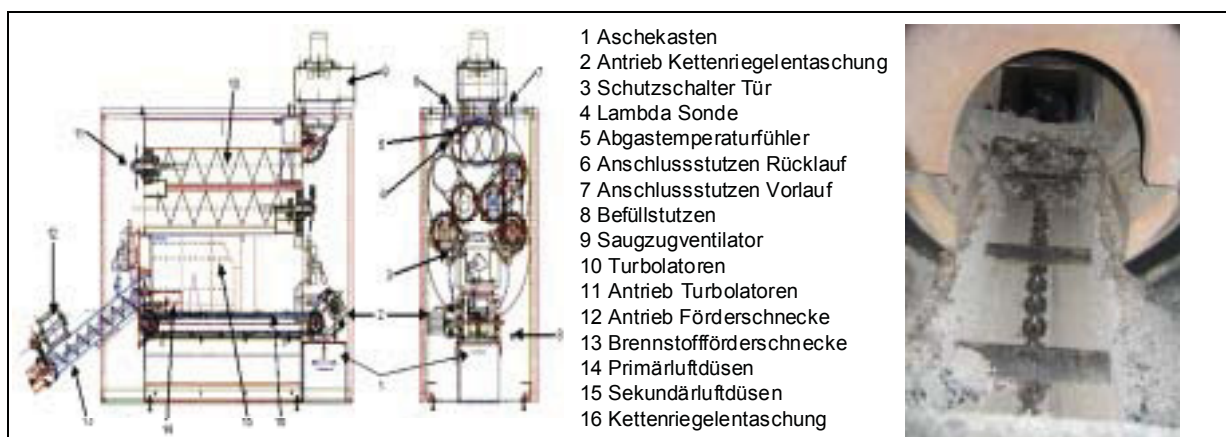


Abbildung 14: Funktionsschema (links), Riegelkettenentaschung am RHK AK-60 (rechts, Quelle /10/)

Anlagentechnologie 6: Brennmuldenfeuerung der Firma Ökotherm (Deutschland)

Anlagentyp: C1L (Feldtests FH Köln)

Der untersuchte Kessel vom Typ C1L der Firma Ökotherm (s. Abb. 15) am Standort der Firma Müller Habbel Forsttechnik in Kirchhundem hat eine NWL von 120 kW (minimale Last: 40 kW) bei Betrieb mit Hackschnitzeln (Wassergehalt 20 %) und ist laut Herstellerangabe auch für halmgutartige Brennstoffe wie Getreide, Stroh-, Heu- und Rapskuchenpellets u.a. geeignet. Die Quereinschubfeuerung verfügt über eine wassergekühlte Brennmulde, um Verschlackungen entgegen zu wirken. Der Brennstoff wird über eine Schnecke in den Brennraum eingetragen. In diesem Brennraum befinden sich seitliche Öffnungen, durch die Primärluft und Sekundärluft eingeführt wird. Diese Verbrennungsluft wird durch eine manuell verstellbare Klappe aufgeteilt und von einem steuerbaren Gebläse eingetragen. Ein Ascheschieber befördert die Asche automatisch in einen Aschekasten. Die heißen Abgase strömen über einen vertikal angeordneten Keramik – Kanal und anschließend zur Wärmeabgabe über die vertikalen Rauchrohre. Um die Rauchrohre sowie den Keramik – Kanal manuell zu reinigen kann eine große Tür, die über die gesamte Kesselfront reicht, geöffnet werden.

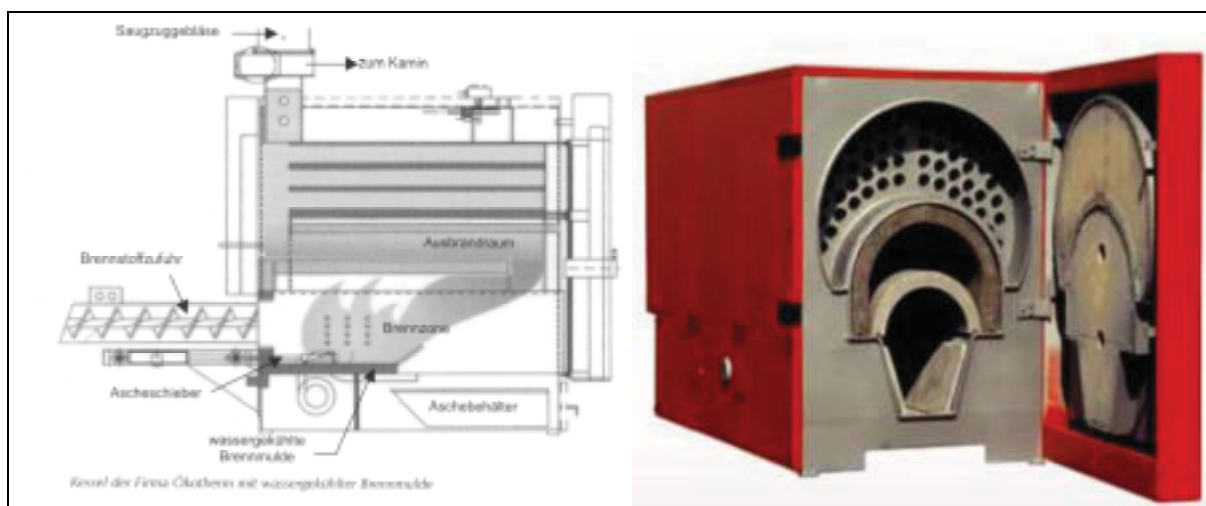


Abbildung 15: Funktionsschema (links), C1L (rechts, Quelle /10/)

Anlagentechnologie 7: Unterschubfeuerung Firma Biokompakt (Österreich)

Anlagentyp: AWK 45 (Feldtests FBZ, FH Köln)

Der Kessel vom Typ AWK 45 der Firma Biokompakt aus Österreich, wurde in Feldtests an den Standorten des Lehr- und Versuchsgutes in Bernburg (FBZ) bzw. in Weslarn / Soest (FH Köln) geprüft und hat eine NWL von 12 – 45 kW (s. Abb. 16).

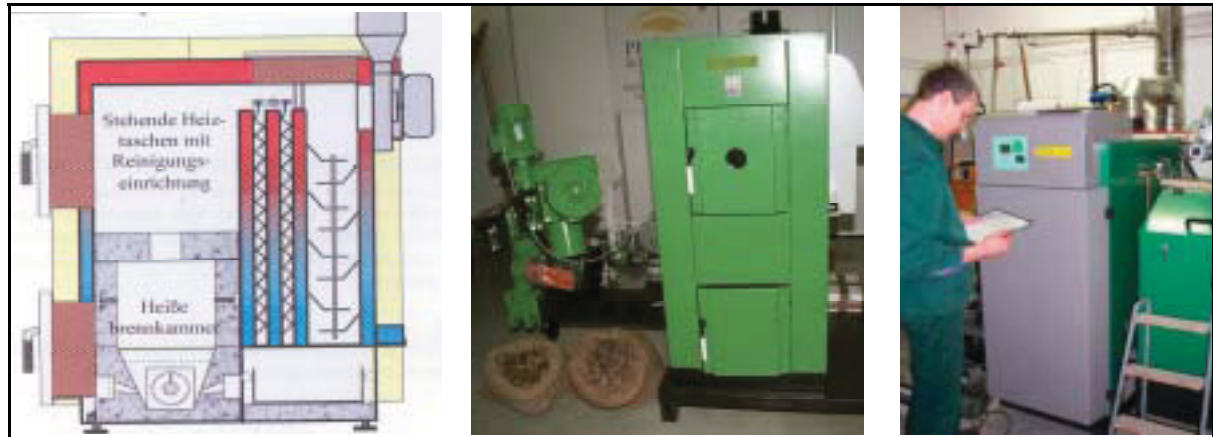


Abbildung 16: Funktionsschema (links), AWK 45 Standort Weslarn (mitte), Standort Bernburg (rechts) [Quelle /10/ und /11/]

Laut Herstellerangaben ist er für feuchte Brennstoffe wie Holzhackschnitzel sowie Getreide und Pellets geeignet. Die Brennstoffzufuhr für die Unterschubfeuerung erfolgt über eine Stokerschnecke in eine keramische Feuerungsretorte hinein. Eine Vorwärmung der Verbrennungsluft, die aufgeteilt in Primär – und Sekundärluft eingebracht wird, soll die Eignung von feuchten Brennstoffen gewährleisten. Zur Wärmeabgabe von den heißen Abgasen an das Heizsystem sind vertikale Wärmeplatten verbaut. Die Abgase werden über einen Saugzugventilator zur Zugstabilisierung in den Kamin abgeführt. Als technische Maßnahme zur Verminderung von Schlackebildung wird ein Verbrennungsindikator auf Kalkbasis beigemischt, um die Ascheschmelztemperatur zu erhöhen.

Anlagentechnologie 8: Ganzballenvergaser Firma Herlt (Deutschland)

Anlagentyp: HSV 145 (Feldtests der UBG, Zusammenarbeit mit TLL)

Der einzige deutsche Anbieter von Ganzballenvergasern ist die Firma Herlt aus Vielitz in Mecklenburg-Vorpommern (s. Abb. 17). Der untersuchte Strohballenvergaser am Standort Wiesenburg (Sachsen) mit einer NWL von 145 kW zeichnet sich durch die diskontinuierliche Beschickung mit Rundballen aus (s. Abb. 18 bis 21). Nach einer Vorheizphase des Vergaserraumes mit Holz (manuelle Zündung) werden die Strohballen mittels Gabelstapler aufgelegt. Aufgrund der Beschickungsweise empfiehlt der Hersteller, dass sich die Befüllseite im Freien befindet, damit bei der Beschickung austretende Rauchgase ohne Brandgefahr nach oben abziehen können. Die im Vergaserraum frei werdenden Gase werden durch eine Brenndüse in die darunter liegende Wirbelbrennkammer geleitet und dort mit zugeführter Sekundärluft vermischt und verbrannt. Ein Teil der Abluft wird in den Vergaserraum zurückgeleitet. Der andere Teil gelangt über eine Nachbrennkammer mit integriertem Wärmetauscher. Alle Baugruppen sind keramisch ausgekleidet und thermisch isoliert.

Der Ascheaustrag erfolgt diskontinuierlich und manuell.

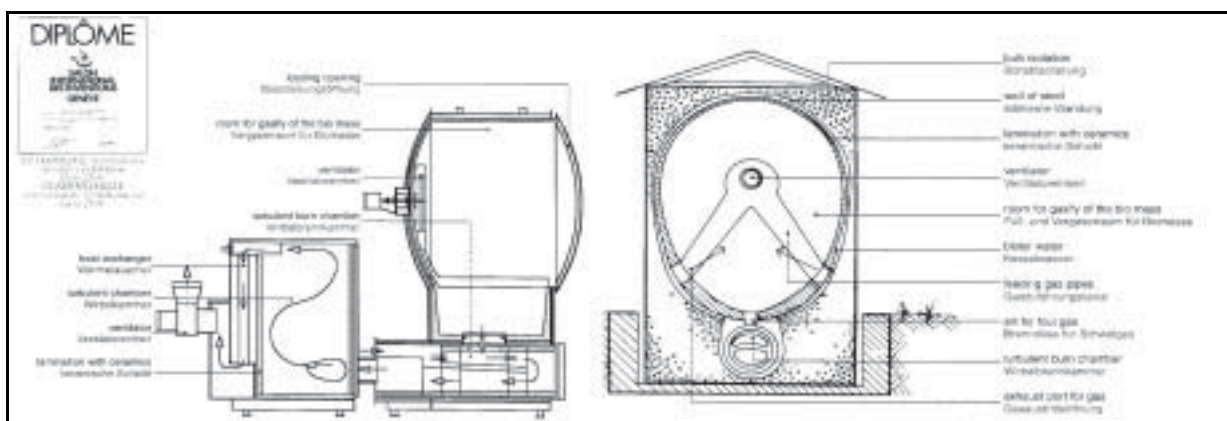


Abbildung 17: Funktionsschema (oben), HSV 145 (unten links), Wirbelbrennkammer (unten rechts) [Quelle Werksprospekt]



Abbildung 18: Diskontinuierliche Beschickung (links, Quelle 17/), HSV 145 Gesamtanlage Standort Wiesenburg (rechts)

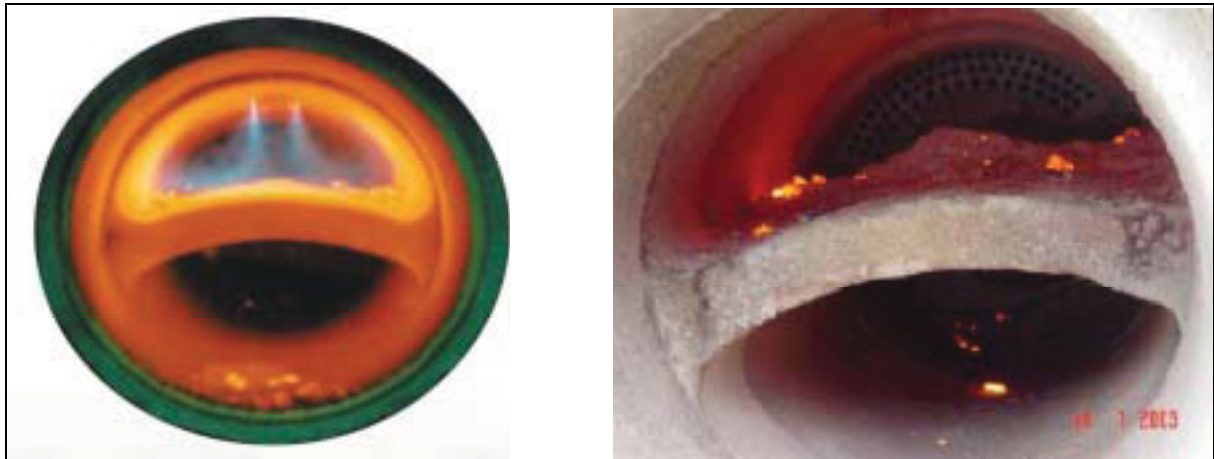


Abbildung 19: Schema Wirbelbrennkammer (links; [Quelle: Werksprospekt]), Wirbelbrennkammer HSV 145 Standort Wiesenburg (rechts, Quelle /7/)



Abbildung 20: Ausbrandphase (links), Glut nach Ausbrandphase (rechts) [Quelle /7/]



Abbildung 21: Anheizholz (oben links), Typenschild HSV 145 (unten links), Vergaserkammer (rechts)

Anlagentechnologie 9: Brennmuldenfeuerung Firma Linka Maskinfabrik A/S (Dänemark)

Anlagentyp: H - 400 (Feldtests TLL, Zusammenarbeit mit ILK)

Der untersuchte Kessel der dänischen Firma Linka A/S hat eine NWL von 400 kW und ist als Quereinschubfeuerung konstruiert. Die Beschickung des dreizügigen Kessels erfolgt kontinuierlich mit Quaderballen. Dabei werden die Strohballen über Strohbahnen einem Ballenhäcksler zugeführt (s. Abb. 22). Das gehäckselte Stroh wird pneumatisch ins Kesselhaus (s. Abb. 23) und über eine Zellenradschleuse mit Stokerschnecken in den Feuerraum (s. Abb. 24) transportiert, Zündung und Ascheaustrag erfolgen automatisch. Die Abreinigung der Rauchgase erfolgt mit einem Gewebefilter (s. Abb. 25).



Abbildung 22: Strohlagerhalle mit Strohauflegebahn (links), Ballenauflöser (rechts)



Abbildung 23: Pneumatischer Strohtransport mit Entstaubungssystem (links), Kesselhaus (rechts)



Abbildung 24: Blick in den Feuerraum (links), Sekundärluftzuführung und Verschlackungen im Feuerraum (rechts)



Abbildung 25: Brennmuldenfeuerung LinKa H 400 (links), Gewebefilter (rechts)

Sonstige Anlagentechnologien: Unterschubfeuerung der Firma Innovative Heiztechnik (IHT) (Deutschland) und Vorschubtreppenrostfeuerung der Firma Schmid (Schweiz), **Anlagentypen IHT GE 30** und **UTSW 360** (Feldtests und Voruntersuchungen TLL in Zusammenarbeit mit TLUG)

Ergänzend zu den im Projekt vorgesehenen Anlagen wurde durch die TLL/TLUG der GE 30 der Firma IHT (s. Abb. 26) aus Warendorf bzw. der UTSW 360 der Firma Schmid (s. Abb. 27) mit einzelnen Referenzbrennstoffen untersucht. Bei der ersten Technologie handelt es sich um eine Unterschubfeuerung mit einer Nennwärmeleistung beim Einsatz halmgutartiger Brennstoffe von 30 kW. Er ist nach Herstellerangaben für die Verbrennung von Getreide, Strohpellets, Rapskuchen und Gärresten geeignet.

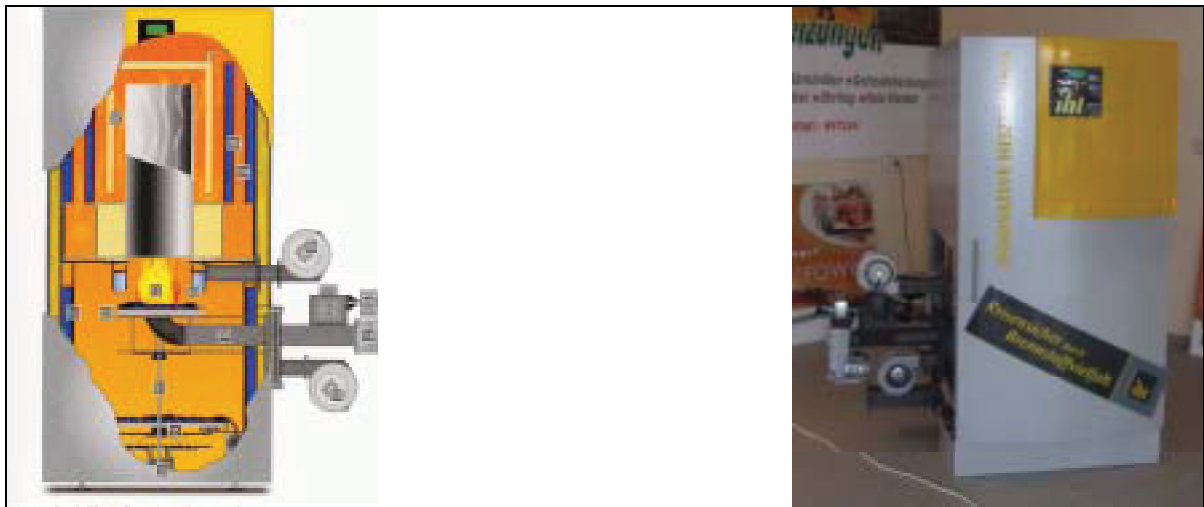


Abbildung 26: Funktionsschema IHT GE 30 (links, Quelle Werksprospekt), Messeanlage (rechts)



Abbildung 27: Vorschubtreppenrostfeuerung UTSW 360 mit Metallgewebefilter der Firma Oskar Winkel (links), Blick in eine Gewebefilterabscheidungskammer mit Filterpatronen (rechts)

Die zweite Technologie ist ein gekühlter Vorschubtreppenrost mit Rauchgasrezirkulation für Sonderbrennstoffe, hier ausgerüstet mit einem Metallgewebefilter.

2.2 Beschreibung der eingesetzten Brennstoffe

Auf Basis der in den einzelnen Projektanträgen vorgeschlagenen zu untersuchenden Brennstoffe wurden in Zusammenarbeit mit der FNR Vorschläge für im Vergleich der Feuerungsanlagen zu untersuchenden Brennstoffe in den Praxisanlagen erarbeitet. Um eine Bewertung der einzelnen zu untersuchenden Feuerungsanlagen durchführen zu können, ist die Verwendung von einheitlichen Brennstoffen essentiell. Dies betrifft neben dem einzusetzenden Getreide insbesondere die Strohchargen. Letztgenannte weisen besonders große Schwankungsbreiten bei einzelnen Inhaltsstoffen auf. Daher wurde festgelegt, dass neben den in den einzelnen Projekten vorgesehenen ergänzenden Untersuchungen zu besonderen Brennstoffen oder speziellen Fragestellungen wie z.B. Teillastuntersuchungen, Langzeittests, Feststellungen von Abscheidewirkungen etc., weitestgehend Referenzbrennstoffe eingesetzt werden sollen. Die benötigten Mengen wurden von den Projektteilnehmern kalkuliert. Diese wurden durch die TLL organisiert, analysiert, teilweise eingelagert und nach Bedarf den bundesweiten Partnern zugestellt. Die Pellets wurden durch die PTG GmbH in Apolda hergestellt.

Folgende Brennstoffe wurden als Referenzbrennstoffe festgelegt:

Getreidekörner:	Winterweizen und Wintergerste
Strohpellets:	Winterweizen und Winterroggen
Strohhäcksel:	Winterweizen (selbes Ausgangsmaterial wie Strohpellets)

Die Analytik der Referenzbrennstoffe erfolgte im Labor der TLL. Voraussetzung für die Analyse bildete eine repräsentative Probenahme. Diese wurden von einem erfahrenen Probenehmer der TLL (Herrn Riedel) durchgeführt (s. Abb. 28).



Abbildung 28: Probenahme Referenzbrennstoffe (Getreidekörner)

Um die eingesetzten Brennstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisieren zu können, ist eine einheitliche Untersuchung der Parameter vorzunehmen. Die Parameter orientieren sich an ihrem möglichen Einfluss auf die technische Funktionssicherheit der Anlagen sowie im Hinblick auf ihr Emissionsverhalten. Des weiteren sind sie in Bezug auf ihre Staubbildungsneigung bzw. potentielle Ascheverwertbarkeit von Bedeutung. Die Parameter, Methoden des Aufschlusses und Analyseverfahren sind in Anlage I aufgeführt. Die Auswahl orientierte sich weitestgehend an den Ergebnissen vorangegangener FNR-Projekte [/2/, /21/ bis /23/] sowie den Europäischen Normierungsaktivitäten [/24/, /25/].

Tabelle 5: Übersicht der in den Projekten untersuchten Brennstoffe

Getreidekörner	Stroh		Sonstige
	Pellet	Ballen / Häcksel	
Winterweizen – WW (Referenz)	Winterweizen – WWSP (Referenz)	Winterweizen – WWSH (Referenz)	Holzpellets
Wintergerste – WG (Referenz)	Winterroggen – WRSP (Referenz)	Winterweizen (grau)	Triticale-Ganzpflanzen Pellets
Wintergerste	Triticale ¹⁾	Triticale	Grüngutpellets
Winterroggen	Winterweizen ³⁾		GNP Pellets
Winterweizen ¹⁾			Rapspresskuchen Pellets
Triticale ¹⁾			Getreideausputz ²⁾
Weizenpellets ²⁾			Reinigungspellets ²⁾
Futterweizen ²⁾			Holzhackschnitzel ⁴⁾
Hafer ⁴⁾			

¹⁾ FH Köln Langzeittests, ²⁾ IVD – Passat C8 (Heiligenzimmern), ³⁾ WKI, ⁴⁾ Deula

Die Ergebnisse für die in den Verbrennungsversuchen eingesetzten Referenzbrennstoffe sind in den Tabellen 6 bis 14 aufgeführt. Des Weiteren werden sie in den Abbildungen 29 bis 35 und 37, zu den erweiterten Datensätzen der Datenbank der TLL mit den entsprechenden Schwankungsbreiten und Mittelwerten relevanter biogener Festbrennstoffe in Relation gestellt.

2.3 Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen

2.3.1 Emissionsrelevante Brennstoffeigenschaften

Erwartungsgemäß unterscheiden sich die untersuchten Halmgutbrennstoffe hinsichtlich der Konzentrationen emissionsrelevanter Inhaltsstoffe teilweise erheblich von denen der holzartigen Brennstoffe (s. Abb. 29 bis 31) [/2/, /23/, /27/]. Es sind aber auch zwischen den halmgutartigen Festbrennstoffen deutliche Unterschiede erkennbar bzw. einzelne Parameter besonders auffällig. So sind zum Beispiel bei den Getreidekörnern besonders hohe Stickstoffgehalte nachweisbar, während bei Strohchargen besonders hinsichtlich der Chlorgehalte auffällige Abweichungen feststellbar sind. Daraus folgt, dass eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Brennstoffgruppen (z.B. Getreidekörner, Getreidestroh, Waldrestholz, Holz aus KUP) vorzunehmen ist, wenn eine entsprechende Einschätzung der einzelnen Brennstoffqualitäten bzw. damit verbunden eine Ableitung einer Klassifizierung von Biobrennstoffen vorgenommen werden soll. Dies ist notwendig, um daraus entsprechende systemrelevante Prognosen wie z.B. zur Tauglichkeit von Brennstoffen, Immissionsprognosen, Kosten, etc. ableiten zu können.

Die sich in Vorbereitung befindliche Technische Spezifikation von festen Biobrennstoffen CEN/TS 14961, welche auf europäischer Ebene erarbeitet wird, bietet dabei einen geeigneten Rahmen für die Einordnung solcher Brennstoffgruppen. Die dabei vorgeschlagenen Brennstoffklassifizierungen sollten sinnvoller Weise in praktikable, am Markt orientierte Produkt- bzw. Handelsklassen resultieren, welche sich mit ihren Inhalten zum einen in entsprechenden z.T. auch zertifizierten Produktlabeln (wie z.B. DINplus-Pellets, /33/) und zum anderen in einschlägigen Emissionsvorschriften wie z.B. 1. BImSchV bzw. TA Luft wiederfinden sollten. Damit wird für alle Beteiligten vom Verbraucher über Händler bis hin zum Handwerker oder Kesselhersteller die Grundlage für eine Rechtssicherheit gelegt. Auf einen Vergleich zur DIN 51731 [/34/], der ÖNORM M 7135 [/35/] oder weiterer Normen wird aufgrund der spezifischen Unterschiede der im Projekt betrachteten Brennstoffklassen im Folgenden verzichtet.

2.3.1.1 Stickstoff

Getreidekörner (im Sinne der CEN/TS 14961 – Halmgutartige Biomasse – Halmgut aus Landwirtschaft und Gartenbau – Getreide – Körner oder Samen; s. Punkt 2.1.1.3, /25/) weisen im Vergleich zu den sonstigen naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen deutlich erhöhte Konzentrationen an Stickstoff auf (s. Abb. 29). Noch höhere Werte wurden bei Ölsaaten mit bis zu 3,85 % i. d. TM (nach CEN/TS 14961 – Samen; s. Punkt 2.1.3.3) ermittelt. Dies lässt nach den vorliegenden Erfahrungen bei Optimierung des Ausbrandes und dem Einsatz in herkömmlichen Kleinf Feuerungsanlagen deutlich erhöhte Stickoxidemissionen erwarten [/2/, /23/ und /26/ bis /32/].

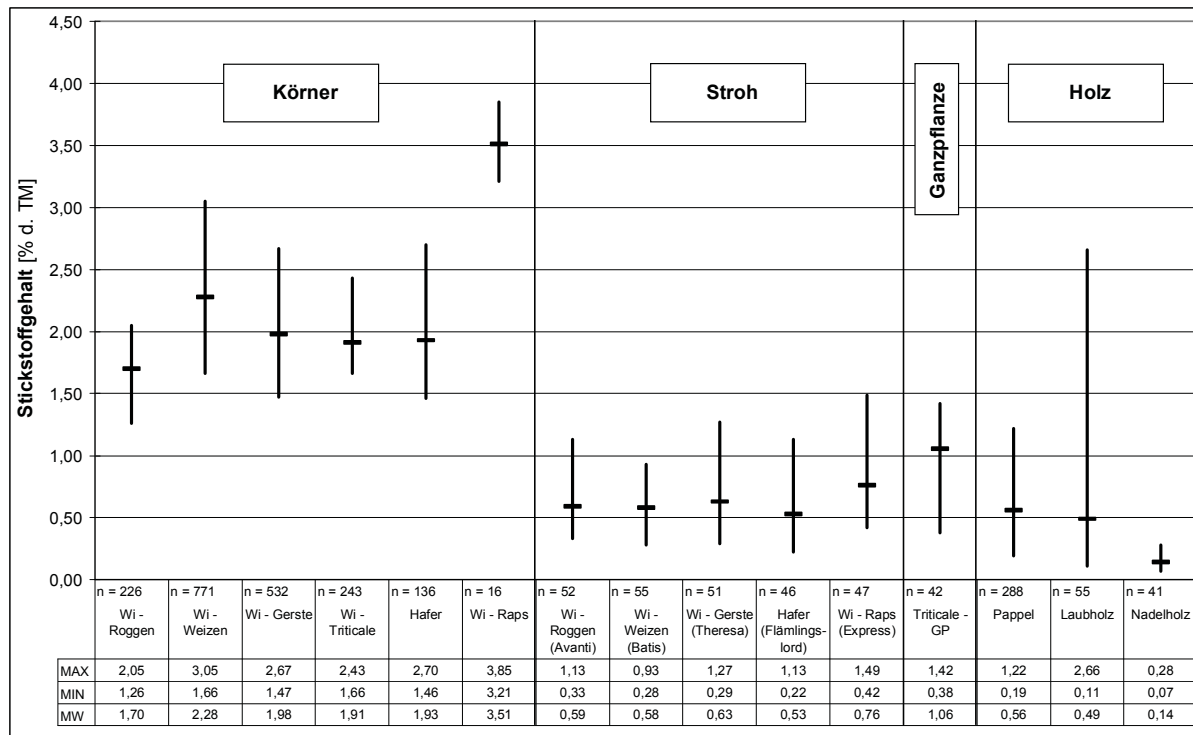


Abbildung 29: Vergleich der Stickstoffgehalte biogener Festbrennstoffe [/2/, /23/, /27/, /36/]

Abbildung 29 zeigt, dass sich die Extremwerte (Minimal- zu Maximalwerten) um bis zu Faktor 2,4 zwischen den hier aufgeführten Getreidearten unterscheiden können. Es wird aber auch deutlich, dass dieser Faktor bei naturbelassenen Hölzern bei 38 liegt und das hier Höchstkonzentrationen durch Hartmann [/27/] für Laubhölzer nachgewiesen wurden, welche auf dem Niveau der Getreidekörner liegen. Letztere liegen im Mittel mit ca. 2,0 % Stickstoff i. d. TM um Faktor 3,3 höher gegenüber den verschiedenen Stroharten (im Mittel ca. 0,6 %). Im Vergleich der Getreidekörner weisen Roggenkörner (n = 226), mit durchschnittlich 1,70 % i. d. TM und damit im Mittel bis ca. 25 % geringere Stickstoffanteile auf als die stickstoffreichsten Weizenkörner (2,28 %, n = 771). Die Stickstoffgehalte der Strohchargen liegen durchschnittlich nur geringfügig höher als die der Laubhölzer einschließlich Pappeln aus KUP.

Die Analysen der vier Referenzbrennstoffe (s. Tab. 6) ergaben Konzentrationen des Stickstoffgehaltes innerhalb der in der TLL Datenbank aufgeführten Schwankungsbreiten. Während die Werte für Wintergerstenkörner (WG (RB); 1,87 % i. d. TM) und Winterweizenstroh (WWSP/SH (RB); 0,62 % i. d. TM) nahe an den Mittelwerten der Datenbankwerte lagen, wurden für Winterweizenkörner (WW (RB), 2,59 % i. d. TM) und Winterroggenstroh (WRSP (RB); 1,06 % i. d. TM) Werte im oberen Bereich festgestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Stickstoffgehalte der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
N [in % d. TM]	2,59	1,87	0,62	1,06

2.3.1.2 Schwefel

In Bezug auf die Schwefelgehalte gilt, dass die Gehalte der Getreidekörner ähnlich dem Stickstoffgehalt höher als die der Strohchargen und diese wiederum höher als die der holzartigen Brennstoffe liegen (s. Abb. 30). Sie liegen dabei mit absoluten Werten, bezogen auf die Trockenmasse, bei weniger als einem Zehntel der Stickstoffgehalte.

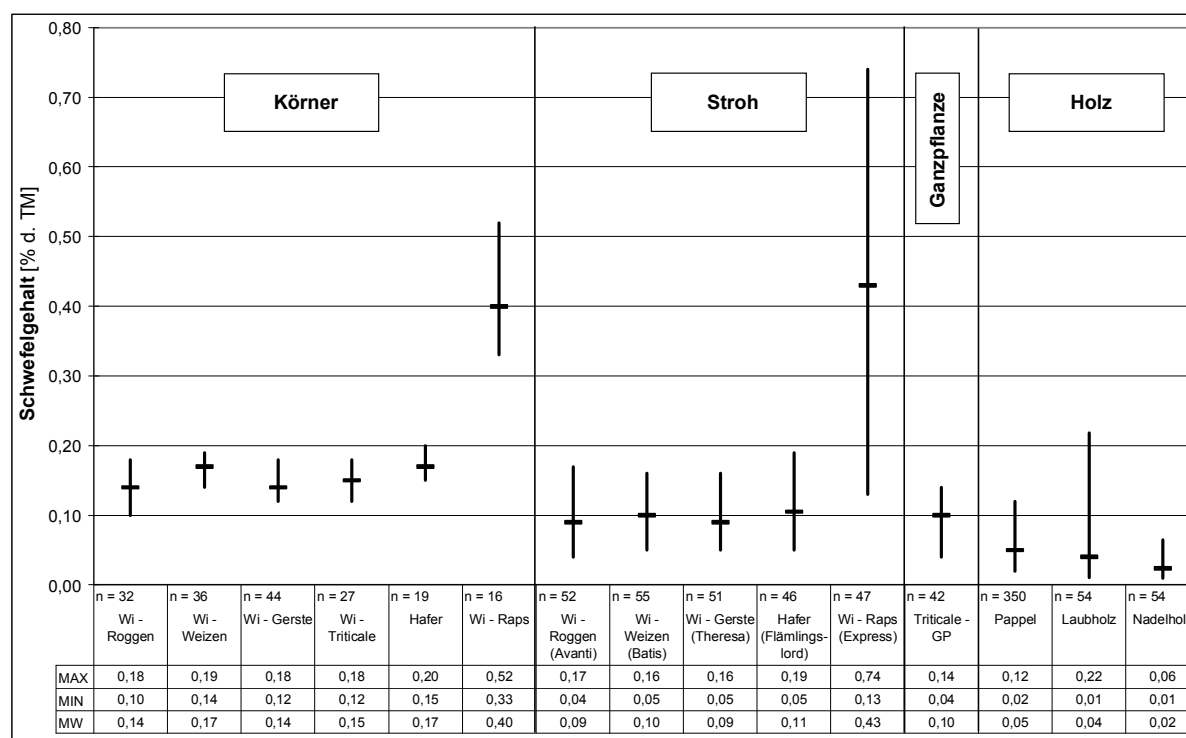


Abbildung 30: Vergleich der Schwefelgehalte biogener Festbrennstoffe [/2/, /23/, /27/, /36/]

Die mittleren Schwefelgehalte der Getreidekörner liegen mit durchschnittlich 0,16 % i. d. TM in engen Schwankungsbreiten (0,10 bis 0,20 %) um Faktor 1,6 über dem Niveau der Getreidestrohchargen (0,10 %) bzw. um ca. Faktor 4 über holzartigen Brennstoffen (s. Abb. 30). Der Vergleich zu den naturbelassenen Hölzern zeigt auch für Schwefel Höchstkonzentrationen bei Laubholzuntersuchungen auf dem Niveau von Getreidekörnern.

Tabelle 7: Vergleich der Schwefelgehalte der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
S [in % d. TM]	0,17	0,13	0,08	0,10

Die Analysen der vier Referenzbrennstoffe (s. Tab. 7) ergaben für alle Konzentrationen des Schwefelgehaltes minimale Abweichungen von den Mittelwerten der TLL Datenbank.

2.3.1.3 Chlor

Generell wird davon ausgegangen, dass halmgutartige Biomassen höhere Chlorgehalte aufweisen als Waldrestholz bzw. Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen. Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen diese Aussage im generellen und zeigen zudem deutliche Unterschiede zwischen Getreidekörnern und Stroh (s. Abb. 31).

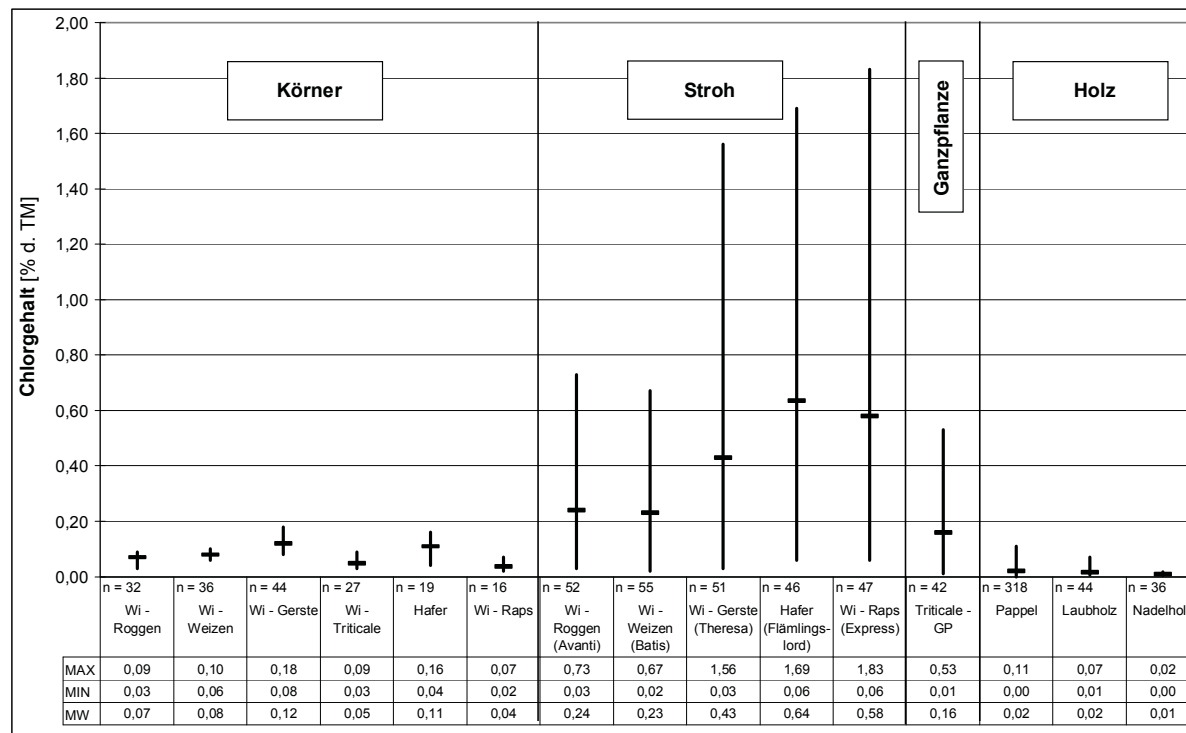


Abbildung 31: Vergleich der Chlorgehalte biogener Festbrennstoffe [2/, 23/, 27/, 36/]

Während bei allen Getreidekörnerchargen mit sehr geringen Schwankungsbreiten (Minimum 0,03 % und Maximum 0,18 %; n = 158) mittlere Chlorgehalte von 0,09 % i. d. TM nachgewiesen wurden, lagen bei den Stroharten die Mittelwerte mit 0,23 % i. d. TM für Nacktgetreidearten (n = 107) um ca. Faktor 2,6 und für Spelzgetreidearten mit 0,53 % i. d. TM (n = 97) um ca. Faktor 5,9 höher als bei den Getreidekörnerchargen. Der Vergleich zu den naturbelassenen Hölzern zeigt auch für Chlor Höchstkonzentrationen von Einzelwerten bei Laubholzuntersuchungen auf dem Niveau von Getreidekörnern.

Besonders auffällig sind die wesentlich höheren Niveaus und die größeren Schwankungsbreiten bei den Stroharten Wintergerste, Hafer und Raps. Dieses Stroh wird im Gegensatz zu denen der Nacktgetreidearten von z. B. Weizen und Roggen, relativ früh und damit „unreif“ bzw. „grün“ geerntet. Des weiteren ist aus früheren Untersuchungen von Vetter et. al. [30/, 36/, 37/] bekannt, dass eine Kaliumvorratsdüngung in Form von KCl wesentlichen Einfluß auf die Pflanzeninhaltsstoffkonzentrationen hat.

Die Analysen der vier Referenzbrennstoffe (s. Tab. 8) ergaben für die Konzentrationen des Chlorgehaltes bei den Winterweizenkörnern sowie beim Winterroggenstroh minimale Abweichungen von den Mittelwerten der TLL Datenbank. Die Werte für Wintergerstenkörner und Winterweizenstroh lagen mit 0,09 % und 0,04 % i. d. TM auf sehr niedrigem Niveau.

Tabelle 8: Vergleich der Chlorgehalte der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
Cl [in % d. TM]	0,08	0,09	0,04	0,26

2.3.2 Sonstige Brennstoffeigenschaften

2.3.2.1 Mineralische Inhaltsstoffe

Bei der Verschlackungsneigung besonders relevant sind die Gehalte an Kalium, Kalzium und Magnesium. Kalium wirkt dabei schmelzpunktsenkend und Kalzium schmelzpunkterhöhend. Die Wirkung von Magnesium auf den Ascheschmelzpunkt von Biomassen ist bislang noch nicht eindeutig geklärt. Bei Untersuchungen von Hartmann [27/] zu Holzbrennstoffen wurde eine schmelzpunktsenkende Wirkung ermittelt. Ergebnisse aus Untersuchungen mit Halmgütern zeigten für diese eine erhöhende Wirkung [30/].

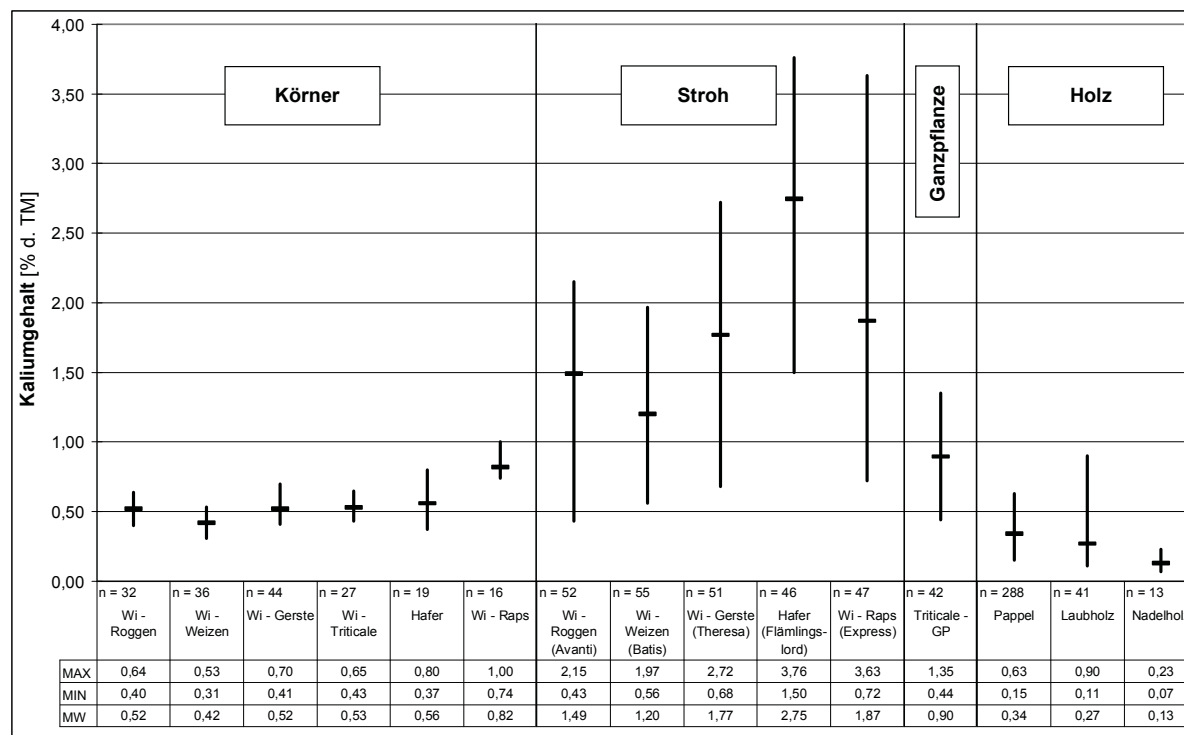


Abbildung 32: Vergleich der Kaliumgehalte biogener Festbrennstoffe [2/, /23/, /27/, /36/]

Getreidekörner weisen relativ homogene, im Vergleich zu Stroh um Faktor 3 bis 5 geringere Kaliumgehalte auf (\bar{x} ca. 0,5 % K i. d. TM; s. Abb. 32). Im Vergleich zu Waldresthölzern bzw. Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind die Werte im Mittel etwa doppelt so hoch. Die Ergebnisse der untersuchten Referenzbrennstoffe lagen in allen Fällen unter den Mittelwerten der Schwankungsbreiten (s. Tab. 9). In Einzelfällen wie z.B. bei

Winterweizenstroh mit lediglich 0,50 % Kalium i. d. TM lagen sie sogar deutlich unter den bisherigen Minimalwerten. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Bereitstellung der Brennstoffe von Thüringer Flächen erfolgte, welche durch eine gute Kaliumgrundversorgung gekennzeichnet sind (Muschelkalkstandorte) und welche von den lokalen Bewirtschaftern kaum mit Kalium gedüngt werden.

Tabelle 9: Vergleich der mineralischen Inhaltstoffe der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
K [in % d. TM]	0,32	0,46	0,50	1,20
Ca [in % d. TM]	0,04	0,05	0,34	0,41
Mg [in % d. TM]	0,09	0,10	0,10	0,11
Na [in mg/kg d. TM]	46	54	156	261

Die Kalziumgehalte bei Getreidekörnern liegen auf niedrigem Niveau im Vergleich zu den Kaliumgehalten und sind mit ca. Faktor 10 auch deutlich geringer als bei Stroh und Holz (s. Abb. 33). Nacktgetreidekörner weisen im Durchschnitt mit ca. 0,05 % i. d. TM (n = 95) im Vergleich zu Spelzgetreidekörnern im Mittel bei 0,08 (n = 63) etwa 1,5-fach geringere Gehalte an Kalzium auf. Stroh von Nacktgetreidearten liegt mit ca. Faktor 1,3 unter den mittleren Werten der Spelzgetreidestrohsorten. Während Laubhölzer (0,35 % i. d. TM, n = 45) in etwa gleiche Konzentrationen an Kalzium aufweisen wie das Stroh wird deutlich, dass Nadelholz wie auch Pappelholz aus KUP im Mittel um etwa 65 % höhere Kalziumanteile aufweisen. Die Konzentrationen der Referenzbrennstoffe lagen innerhalb der Schwankungsbreiten (s. Tab. 9).

Die Magnesiumgehalte der biogenen Festbrennstoffe liegen relativ homogen zwischen 0,05 und 0,15 % i. d. TM (s. Abb. 34). Während Getreidekörner in diesen Schwankungsbreiten eher höhere Werte aufweisen (im Mittel bei ca. 0,11 % i. d. TM) liegen die Werte der Getreidestrohartarten mit im Mittel etwa 0,085 % i. d. TM in der Mitte und die naturbelassenen Hölzer im unteren Bereich (0,07 % i. d. TM). Die Konzentrationen der Referenzbrennstoffe lagen innerhalb der Schwankungsbreiten (s. Tab. 9).

Mit Ausnahme des Spelzgetreidestrohs sowie bei Pappeln aus KUP lassen sich für die Natriumgehalte nur sehr geringe Konzentrationen nachweisen (s. Abb. 35). Die Konzentrationen der Referenzbrennstoffe lagen mit Ausnahme des Roggenstrohs (261 mg/kg i. d. TM) innerhalb der Schwankungsbreiten (s. Tab. 9).

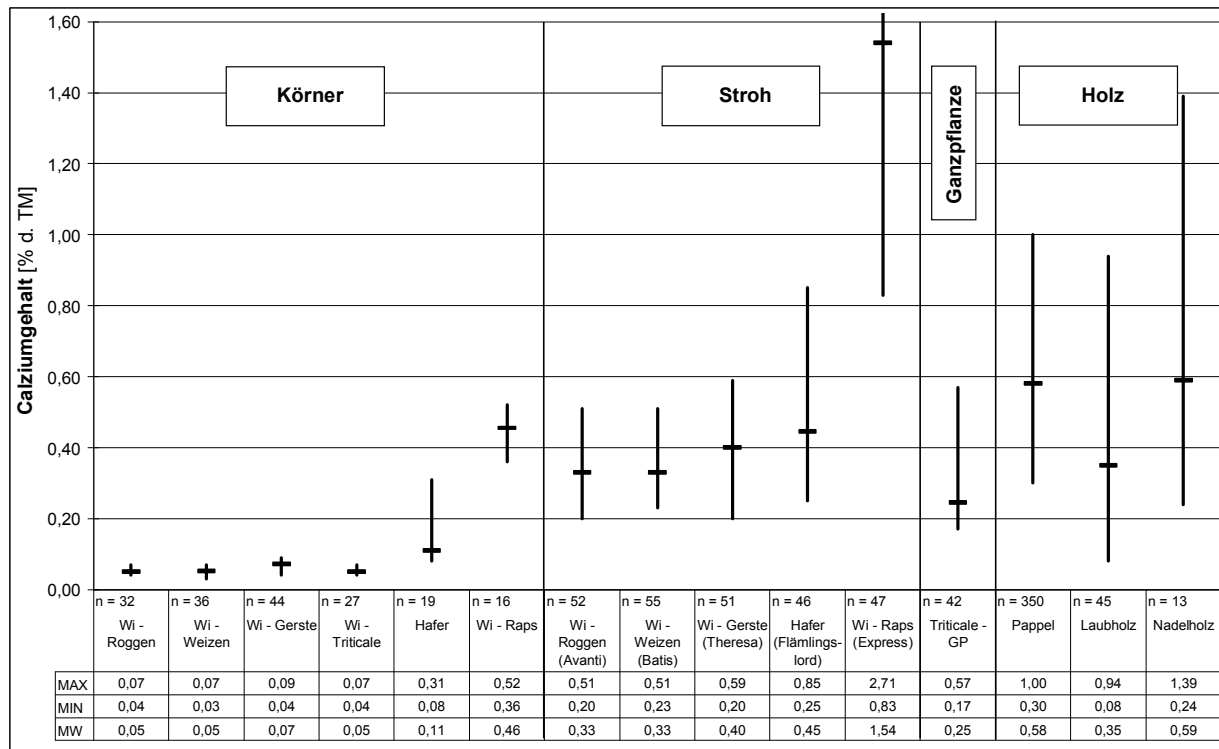


Abbildung 33: Vergleich der Kalziumgehalte biogener Festbrennstoffe [/2/, /23/, /27/, /36/]

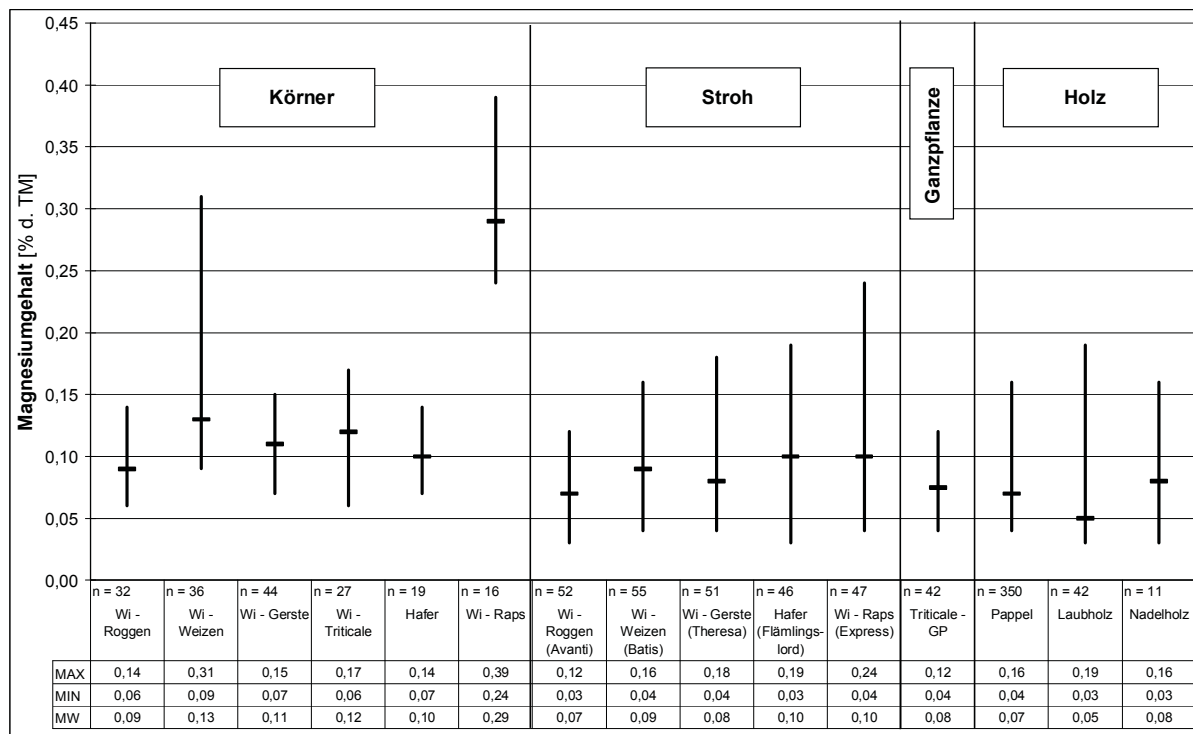


Abbildung 34: Vergleich der Magnesiumgehalte biogener Festbrennstoffe [/2/, /23/, /27/, /36/]

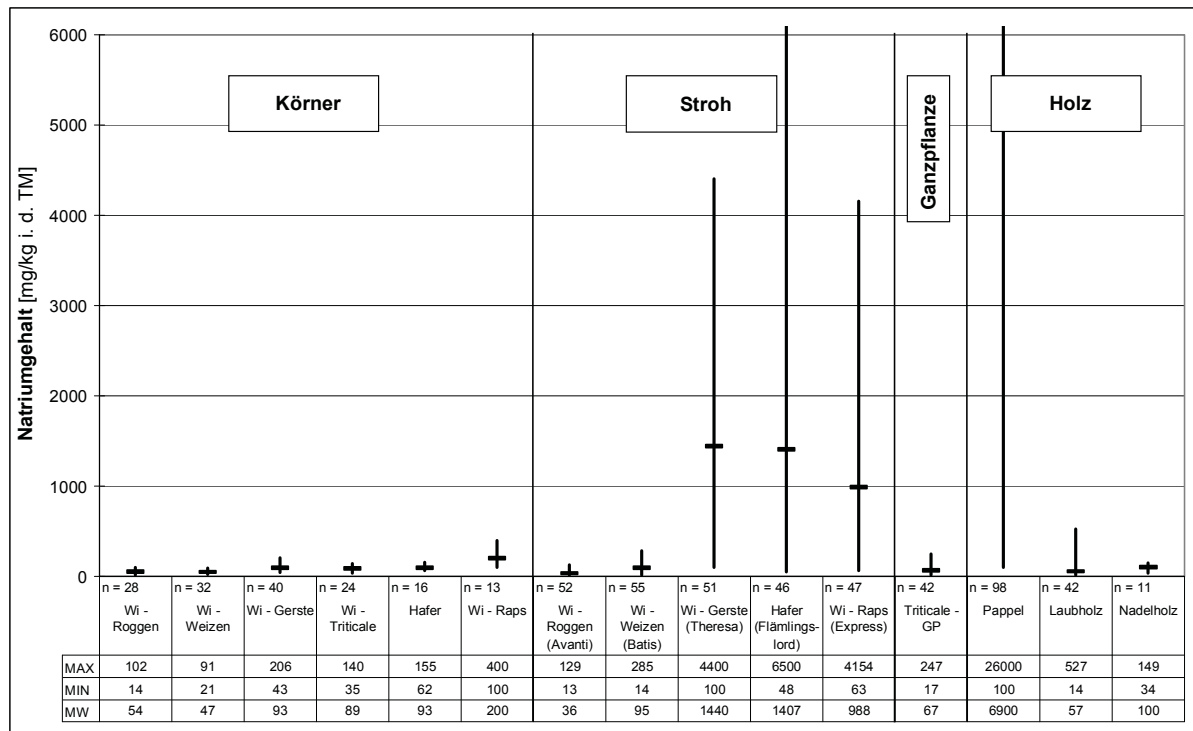


Abbildung 35: Vergleich der Natriumgehalte biogener Festbrennstoffe biogener Festbrennstoffe [2/, 23/, 27/, 36/]

2.3.2.2 Ascheerweichungsverhalten

Der niedrigere Ascheschmelzpunkt landwirtschaftlicher Haupt- und Nebenprodukte ist teilweise problematisch in Bezug auf die Funktionssicherheit sowie das Emissionsverhalten von Feuerungsanlagen bei der energetischen Verwertung dieser Brennstoffe. In der Vergangenheit wurden beim Einsatz dieser Stoffe in herkömmlichen Holzfeuerungsanlagen sowie in als halmguttauglich deklarierten Feuerungsanlagen immer wieder Störungen im Betriebsverlauf durch starke Verschlackungen im Feuerraum, an den Wärmetauschern und Rauchgasleitungen nachgewiesen [2/, 31/]. Zur Charakterisierung der Verschlackungsneigung der Referenzbrennstoffe erfolgte die Analyse des Ascheschmelzverhaltens durch die EUROFINS-AUA GmbH in Freiberg nach DIN 51730: 1998-04 (oxydierende Atmosphäre: Luft) [38/]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Ergebnisse bestätigen im Wesentlichen frühere Untersuchungen [2/] und verdeutlichen zum einen die Unterschiede zwischen Getreidekörnern und Stroh als auch die Unterschiede zwischen Spelz- und Nacktgetreide. Während es bei Spelzgetreide (hier Wintergerstenkörner – WG (RB)) erst ab einem Temperaturbereich von ca. 820 °C zu ersten Versinterungserscheinungen der Aschen kommt, beginnt dieser Prozess bei den Körnern von Nacktgetreidearten (hier: Weizenkörner – WW (RB)), bereits ab ca. 600 - 700 °C. Mit Erweichungstemperaturen bei WG (RB) über 1400 °C liegen Gerstenkörner auf etwa dem Niveau wie DIN Holzpellets und damit deutlich über den Werten von Nacktgetreide als auch von Stroh. Die Ascheerweichungstemperaturen für Getreidestroh liegen beginnend mit Sinterpunkten ab ca. 700 bis 750 °C über alle relevanten Ascheerweichungspunkte hinweg

auf einem mittleren Niveau zwischen den holzartigen Brennstoffen und den Körnern von Nacktgetreidearten.

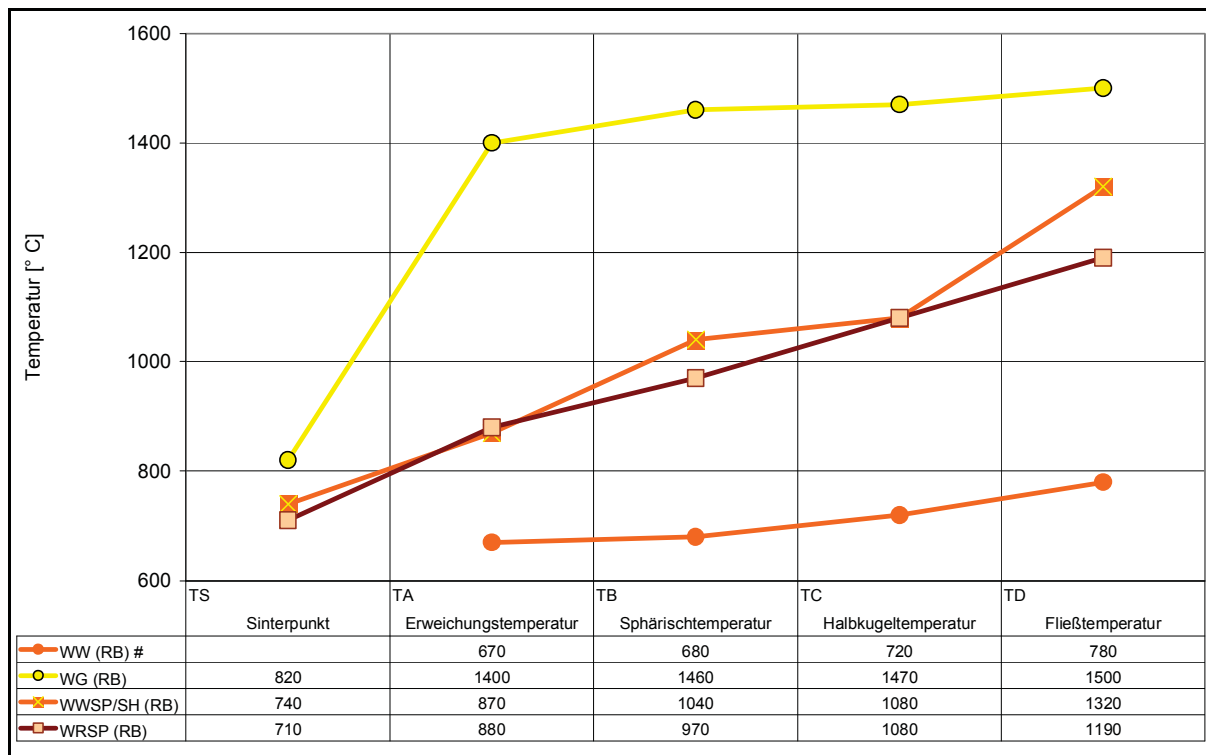


Abbildung 36: Vergleich der Ascheschmelzpunkte der Referenzbrennstoffe

2.3.2.3 Aschegehalt

In Bezug auf den Energiegehalt biogener Festbrennstoffe sowie für die Auslegung der Ascheaustragsysteme von besonderem Interesse ist der Anteil der nicht brennbaren Bestandteile. Diese werden als Staub über das Rauchgassystem ausgetragen oder fallen als Asche im Feuerungssystem teilweise in unterschiedlichen Fraktionen an.

Abbildung 37 stellt die Schwankungsbreiten der Rohaschegehalte der Brennstoffe dar, welche beim Veraschen im Labor bei 550 °C ermittelt wurden. Getreidekörner weisen im Mittel Aschegehalte von 1,5 bis 3,1 % i. d. TM auf und liegen damit zwischen naturbelassenem Waldholz (0,6 bis 0,8 % i. d. TM) an der unteren Grenze und den relativ hohen Ascheanteilen der einzelnen Stroharten (5,5 bis 8,0 % i. d. TM) an der oberen Grenze. Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen verursachen im Mittel mit 2,0 % i. d. TM ähnliche hohe Aschegehalte wie die Getreidekörner. Vergleicht man die Getreidekörner untereinander so kann festgestellt werden, dass die Aschegehalte bei Gerste und Hafer (2,4 und 3,1 % i. d. TM) durch den Spelzanteil etwa 1,5-fach bzw. doppelt so hoch liegen wie bei Weizen und Roggen (1,5 und 1,7 % i. d. TM). Neben den relativ hohen mittleren Aschegehalten der einzelnen Stroharten sind die großen Schwankungsbreiten von 2,6 (Minimum) bis 12,8 % i. d. TM (Maximum) für die Einzelwerte zu beachten. Ursachen extrem hoher Werte können u.a. Lagerbildung sowie außergewöhnliche Witterungsbedingungen sein.

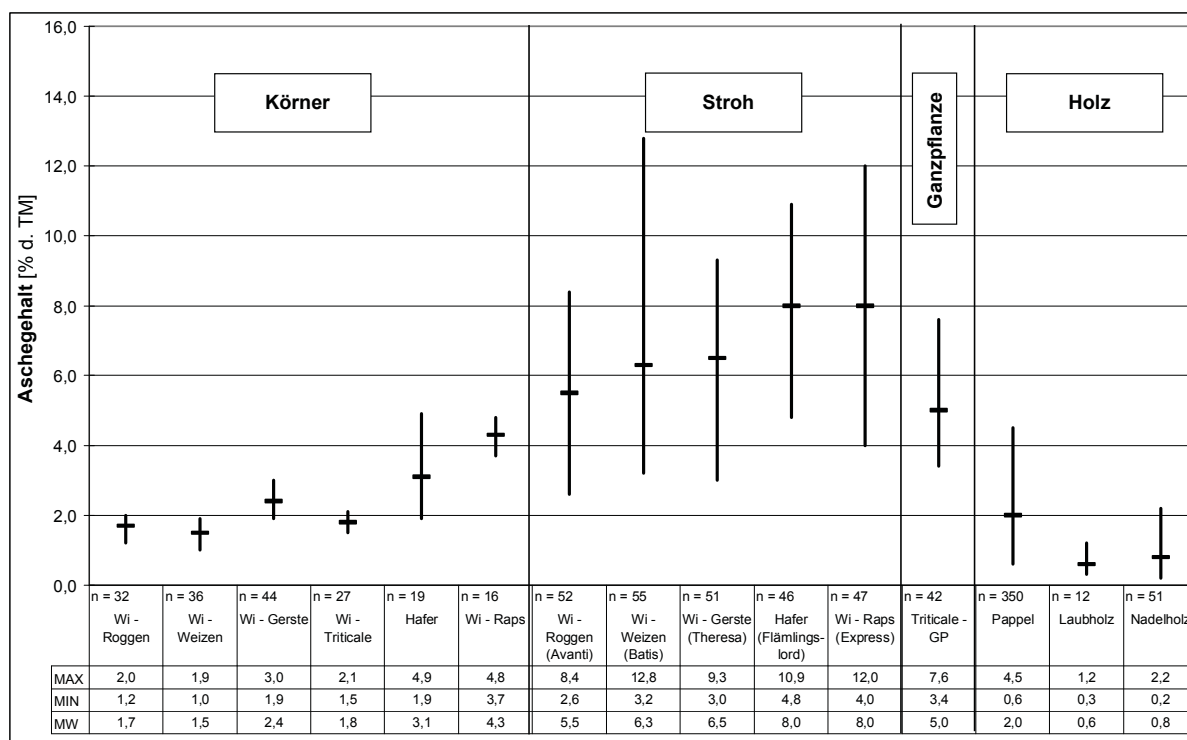


Abbildung 37: Vergleich der Rohaschegehalte biogener Festbrennstoffe [/2/, /23/, /27/, /36/]

Die Ergebnisse der Analysen der vier Referenzbrennstoffe (s. Tab. 10) zeigen, dass die Aschegehalte im Rahmen der Schwankungsbreiten der Datenbanken liegen. Für die untersuchten Getreidekörnerchargen liegen sie mit 1,3 % i. d. TM für Winterweizenkörner und 2,3 % i. d. TM für Wintergerstenkörner nahe an den Mittelwerten, die ermittelten Gehalte für die Strohchargen liegen mit 5,2 % i. d. TM für Winterweizenstroh leicht unter und mit 6,7 % i. d. TM für Winterroggenstroh leicht über den Mittelwerten der TLL-Datenbank für Getreidestroh.

Tabelle 10: Vergleich der Rohaschegehalte der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
Aschegehalt [in % d. TM]	1,3	2,3	5,2	6,7

2.2.2.4 Heizwert

Neben den Wasser- und Aschegehalten ist der für den Energiegehalt der biogenen Festbrennstoffe entscheidende Parameter der Heizwert. Er bestimmt nicht nur die Dimensionierung der Feuerungssysteme sondern bestimmt natürlich auch maßgeblich den materiellen Wert eines Brennstoffes. Um die Heizwerte der Biomassen untereinander vergleichen zu können, wird die Bezugsbasis unterer Heizwert der wasserfreien Substanz ($H_{u(wf)}$) gewählt.

Tabelle 11: Vergleich der Heizwerte der Referenzbrennstoffe

Brennstoff	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
n =	2	3	8	2
Heizwert – $H_{u(wf)}$ [in MJ/kg d. TM]	17,46	16,84	17,01	16,71

Die reinen halmgutartigen Brennstoffe liegen dabei aufgrund ihrer mehr oder weniger höheren Aschegehalte (vgl. Pkt. 2.3.2.3) fast ausnahmslos unter dem in der DIN 51731 [34] vorgegebenen Wert von 17,5 MJ/kg. Dies trifft ebenso für die im Projekt untersuchten Referenzbrennstoffe zu (s. Tab. 11). Das zeigt weiterhin auch für diesen Parameter, dass für die halmgutartigen Brennstoffe eigene Brennstoffklassen herangezogen bzw. Produktnormen entwickelt werden müssen.

2.3.3 Relevante Elemente für die Bildung von Aerosolen

Eine Übersicht über die aerosolbildenden Brennstoffbestandteile der Referenzbrennstoffe des Projekts wird in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Vergleich der aerosolbildenden Inhaltsstoffe der Referenzbrennstoffe

Element	Einheit	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
		n = 2	n = 3	n = 8	n = 2
S	mg/kg/TM	1800	1300	810	978
Cl	mg/kg/TM	800	900	368	264
K	mg/kg/TM	3200	4600	5500	12100
Na	mg/kg/TM	47	54	126	261
Zn	mg/kg/TM	26	31	9	14
Pb	mg/kg/TM	0,021	0,025	0,39	1,34
Gesamt	mg/kg/TM	5873	6885	6813	13618

Die wesentlichen Unterschiede werden besonders bei den Gehalten der hauptsächlich staubbildenden Makroelemente Schwefel, Chlor und Kalium deutlich. Während die Konzentrationen an Schwefel und Chlor zwar in den untersuchten Getreidekörnerchargen etwa doppelt so hoch lagen wie in den Strohchargen, wurden für den Kaliumgehalt nahezu umgekehrte Verhältnisse festgestellt. Da Kalium jedoch absolut gesehen deutlich größere Mengenanteile der Brennstoffinhaltsstoffe ausmacht, ist dieser Parameter der entscheidendere hinsichtlich der Gesamtsumme aerosolbildender Inhaltsstoffe. Die mehr als doppelt so hohen Konzentrationen an Natrium bzw. die etwa zwanzigfach so hohen

Konzentrationen an Blei der Strohchargen tragen zur Gesamtsumme nur unwesentlich bei. Gegenüber vorliegenden Untersuchungen von DIN Holzpellets [23] wird deutlich, dass etwa um Faktor 13 höhere Gesamtsummen bei halmgutartigen Brennstoffen vorzufinden sind. Besonders auffällig sind die fast doppelt so hohen Konzentrationen aerosolbildender Inhaltsstoffe der Roggenstrohreferenzbrennstoffe, welche eine besonders hohe Gesamtstaubentwicklung bei den Verbrennungsversuchen erwarten lassen.

2.3.4 Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung

Die in Bezug auf eine mögliche Ascheverwertung besonders relevanten Brennstoffparameter (s. Tab. 13) unterscheiden sich hinsichtlich der einzelnen Brennstoffe bzw. Parameter teilweise erheblich. Während man für Kupfer und etwas einschränkend für Zink noch annähernd gleich hohe Konzentrationen im Vergleich der Referenzbrennstoffe feststellen kann, gibt es besonders für Chrom, Nickel, Thallium, Blei, Cadmium, Quecksilber, Arsen und Eisen deutlich höhere Gehalte in den Referenzstrohbrennstoffen gegenüber den Referenzgetreidebrennstoffen. Bei naturbelassenen holzartigen Brennstoffen sind diese Konzentrationen teilweise noch deutlich höher.

Besonders auffällig sind die bis um ca. Faktor 30 erhöhten Konzentrationen an Chrom, die bis um Faktor 20 erhöhten Gehalte an Blei (jeweils Winterweizenstroh gegenüber Winterweizenkörnern) sowie die um bis zu ca. Faktor 10 erhöhten Gehalte an Quecksilber und Arsen.

Tabelle 13: Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung

Element	Einheit	Wi-Weizenkörner	Wi-Gerstenkörner	Wi-Weizenstroh	Wi-Roggenstroh
Element	Einheit	WW (RB)	WG (RB)	WWSP/SH (RB)	WRSP (RB)
		n = 2	n = 3	n = 8	n = 2
As	mg/kg TM	0,028	0,024	0,075	0,275
Hg	µg/kg/TM	< 0,5 *	0,7	8,9	10,8
Cd	mg/kg/TM	0,031	0,02	0,055	0,059
Pb	mg/kg/TM	0,021	0,025	0,39	1,34
Cu	mg/kg/TM	4,10	5,56	2,74	3,95
Cr	mg/kg/TM	0,106	0,863	3,300	4,780
Ni	mg/kg/TM	< 0,07 *	0,41	1,47	1,19
Ti	µg/kg/TM	< 0,3 *	0,3	4,2	12
Zn	mg/kg/TM	26,4	30,7	9,4	14,2
Fe	mg/kg/TM	48,4	57,5	231,0	785,0

2.4 Fazit der Brennstoffanalysen

Es wird deutlich, dass die für holzartige Brennstoffe bislang vorliegenden Normen zur Qualitätssicherung der Brennstoffprodukte und Regelungen in den Verordnungen zum Bundesimmissionsschutzgesetz für die Klassifizierung und Einordnung von Getreidekörnern bzw. Stroh ungeeignet sind. Die Unterschiede der einzelnen biogenen Festbrennstoffe zeigen, dass eine differenzierte Betrachtung nicht nur zwischen holz- und halmgutartigen sondern auch innerhalb der halmgutartigen Biobrennstoffe notwendig ist, um praxisnahe

Produktnormen zu entwickeln und am Markt etablieren zu können. Die Herstellung von Mischbrennstoffen kann brennstoffseitig zu deutlichen Verbesserungen gegenüber Reinbrennstoffen führen.

Tabelle 14: Überblick der Analyseergebnisse der Referenzbrennstoffe (RB)

Referenzbrennstoff (RB)	Stichprobenzahl	Mittelwert der N-Gehalte [% d. TM]
Winterweizenkörner – WW	2	2,59
Wintergerstenkörner – WG	3	1,87
Winterweizenstroh – WWSP/SH	8	0,62
Wiinterroggenstroh – WRSP	2	1,06

Referenzbrennstoff (RB)	Stichprobenzahl	Mittelwert der S-Gehalte [% d. TM]
Winterweizenkörner – WW	2	0,17
Wintergerstenkörner – WG	3	0,13
Winterweizenstroh – WWSP/SH	8	0,08
Wiinterroggenstroh – WRSP	2	0,10

Referenzbrennstoff (RB)	Stichprobenzahl	Mittelwert der Cl-Gehalte [% d. TM]
Winterweizenkörner – WW	2	0,08
Wintergerstenkörner – WG	3	0,09
Winterweizenstroh – WWSP/SH	8	0,04
Wiinterroggenstroh – WRSP	2	0,26

Referenzbrennstoff (RB)	Stichprobenzahl	Mittelwerte der Gehalte [% i. d. TM] bzw. *[mg/kg d. TM]			
		K	Na*	Mg	Ca
Winterweizenkörner – WW	2	0,32	46	0,09	0,04
Wintergerstenkörner – WG	3	0,46	54	0,10	0,05
Winterweizenstroh – WWSP/SH	8	0,50	156	0,10	0,34
Wiinterroggenstroh – WRSP	2	1,20	261	0,11	0,41

Referenzbrennstoff (RB)	Stichprobenzahl	Mittelwerte der Gehalte [% i. d. TM]			
		C	H	Aschegehalt	Heizwert
Winterweizenkörner – WW	2	43,6	6,17	1,3	17,46
Wintergerstenkörner – WG	3	43,7	6,04	2,3	16,84
Winterweizenstroh – WWSP/SH	8	46,5	5,76	5,2	17,01
Wiinterroggenstroh – WRSP	2	44,9	5,76	6,7	16,71

3 Ergebnisse der Emissionsmessungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Emissionsmessungen der Projekte der FNR im Rahmen der Bekanntmachung „**Energetische Nutzung von festen Bioenergieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW_{th}**“ dargestellt.

Beginnend mit einer Zusammenfassung der im Projekt der TLL in Zusammenarbeit mit dem ILK untersuchten Strohfeuerungsanlagen [1/] werden weiterhin die Ergebnisse der Untersuchungen für die einzelnen Referenzbrennstoffe aller Projekte mit praxisrelevanten Feuerungsanlagen wiedergegeben. Das sind im Wesentlichen die Messergebnisse der Feldtests mit Referenzbrennstoffen der DEULA Schleswig-Holstein [9/], des FBZ Merseburg [11/], der FH Köln [10/] sowie der TLL in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). Die Darstellungen wurden um die Ergebnisse aus Prüfstandsversuchen des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) aus Straubing, unter Verwendung der Referenzbrennstoffe, vervollständigt [3/]. Mit Referenzbrennstoffen durchgeführte Technikummessungen ergänzen die Ausführungen ebenso wie die Ergebnisse beim Einsatz weiterer neuartiger Technologien.

Die Versuchsbedingungen, die verwendeten Messverfahren sowie die Ergebnisse etc. werden in den entsprechenden Abschlußberichten ausführlich dargestellt. Die Emissionsmessungen wurden möglichst mit nach § 26 BImSchG zertifizierten bzw. vergleichbaren Messstellen (TLL, FBZ, FH Köln, TFZ) bzw. Schornsteinfegermessgeräten und hauseigenen Messmethoden (DEULA, FH Köln, TFZ) durchgeführt. Die vorliegenden Darstellungen der Emissionsmessergebnisse der kontinuierlichen Messungen für die Emissionskomponenten CO, Staub und NO_x (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben mit NO_x als Stickstoffdioxid) erfolgten soweit nicht anders angegeben als Schwankungsbreiten der berechneten Mittelwerte der Minutenwerte von Halbstundenmessungen (TA Luft) bzw. von Viertelstundenmessungen (1. BImSchV), jeweils bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11 bzw. 13 % Vol. O₂. Für die diskontinuierlich bestimmten Emissionskomponenten PCDD/F, PAK (Benzo(a)pyren) sowie BTX (Benzol), die für Anlagen im Geltungsbereich der TA Luft grenzwertrelevant sind, erfolgt die Darstellungsweise hauptsächlich bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt von 11 % Vol. O₂. Für Feinstaub sind die prozentualen Masseanteile der erfassten Fraktionen größer PM₁₀, Partikelgrößen größer 2,5 µm bis 10 µm und PM_{2,5} angegeben. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die als Bewertungsmaßstab herangezogenen Grenzwerte der einschlägigen Verordnungen.

Tabelle 15: Überblick über die als Bewertungsmaßstab herangezogenen Grenzwerte

Parameter	Grenzwert	Leistungsbereich	Einheit	nach	bezogen auf
CO	4,0	15 bis < 100 kW	g / Nm ³	1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
CO	1,0	4 bis < 100 kW	g / Nm ³	Novelle 1. BImSchV 1. Stufe	13 % Vol. O ₂
CO	0,4	4 bis < 100 kW	g / Nm ³	Novelle 1. BImSchV 2. Stufe	13 % Vol. O ₂
Staub	0,15	15 bis < 100 kW	g / Nm ³	1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
Staub	0,10	4 bis < 100 kW	g / Nm ³	Novelle 1. BImSchV 1. Stufe	13 % Vol. O ₂
Staub	0,02	4 bis < 100 kW	g / Nm ³	Novelle 1. BImSchV 2. Stufe	13 % Vol. O ₂
NO _x	600	4 bis < 100 kW	mg / Nm ³	Novelle 1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
PCDD/F	0,1	4 bis < 100 kW	ng / Nm ³	Novelle 1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
SO ₂	1,0	ab 100 kW bis < 50 MW	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
C _{ges}	50	ab 100 kW bis < 50 MW	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
HCl	30	ab 100 kW bis < 50 MW	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
PCDD/F	0,1	ab 100 kW bis < 50 MW	ng / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂
Benzo(a)pyren	0,05	ab 100 kW bis < 50 MW	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
Benzol	1,0	ab 100 kW bis < 50 MW	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
	Praxisanforderungen				
	Typrüfungsanforderungen				

Dabei wurden z.T. mehr und deutlich höhere Anforderungen an die im Rahmen der 1. BImSchV formulierten Grenzwerte für Halmgüter gegenüber holzartigen Brennstoffen hinsichtlich Kohlenmonoxid- und Staubemissionen formuliert. Des Weiteren wurden in Folge der Novellierungsbemühungen zur 1. BImSchV zahlreiche Referentenentwürfe erarbeitet, welche die Aufnahme weiterer halmgutartigen Biobrennstoffe in den Geltungsbereich der Verordnung vorsehen¹. Damit verbunden sind ebenso deutlich höhere Anforderungen an die Zahl der einzuhaltenden Parameter und die Höhe der Grenzwerte. Dies trifft insbesondere im Bereich der Praxismessungen für die Emissionsparameter CO und Staub und im Bereich der Typenprüfungen für die Parameter NO_x und PCDD/F zu (s. Tab. 15).

Für Messungen an Praxisanlagen ist grundsätzlich mit erschwerten Versuchsbedingungen zu rechnen. Die Einstellung der Kesselsteuerung auf den Versuchsbrennstoff gelingt innerhalb des Versuchszeitraums nicht immer optimal. Zudem begrenzen eine mangelnde Wärmeabnahme (Witterung, Verbraucher) und die Auslegung des Heizkessels (Wärmebedarf < Nennleistung) teilweise die Kesselleistung während der Versuche oder schränken das Zeitfenster für die Messungen ein. Es wurde daher versucht, auch mit Hilfe der Hersteller und Betreiber, optimale Versuchsbedingungen zu finden.

Der in Bezug auf die Qualität des Ausbrandes und damit letztendlich auch für den Wirkungsgrad einer Anlage entscheidendste Parameter ist der Gehalt an Kohlenmonoxid im Rauchgas. Für Anlagen zwischen 15 und 100 kW_{th} gilt gegenwärtig für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 8 (Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe) der 1. BImSchV ein Grenzwert von 4,0

¹ z.B. Entwurf zur Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 24.03.2009

g/m³ unter Normbedingungen (d. h. 273 K, 1013 hPa), bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 %. Dieser wurde zu Beginn der Projekte als der im Rahmen des Nachweises der Genehmigungsfähigkeit von Feuerungsanlagen geltende Wert angenommen. Nach dem Länderarbeitskreis Immissionsschutz (LAI) wurde Getreide zu diesem Zeitpunkt nicht als Regelbrennstoff im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 8 eingestuft. Im Verlauf der Projektarbeiten wurden in zahlreichen Bundesländern aufgrund der verstärkten Nachfrage hauptsächlich seitens der Landwirtschaft generelle Emissionsanforderungen für Ausnahmeregelungen im Sinne des § 20 der 1. BImSchV formuliert (s. Tab. 16).

Tabelle 16: Emissionsanforderungen für die Getreideverbrennung in einzelnen Bundesländern [mg/Nm³, 13 % Vol. O₂]

		Staub		CO		NO _x		Anmerkungen
		> 15 < 50 kW	> 50 < 100 kW	> 15 < 50 kW	> 50 < 100 kW	> 15 < 50 kW	> 50 < 100 kW	
Bayern	in Betrieb	100	75	1.000	500	-	-	
	Prüfstand	-	-	-	-	500	-	
Baden-Württemberg	in Betrieb	100	75	1.000	500	-	-	
	Prüfstand	20 in Wohngebieten		500	250	500	-	
NRW	in Betrieb	130	110	1.000	500	-	-	
	Prüfstand	75		500	250	500	-	
Thüringen	in Betrieb	100	75	1.000	500	-	-	
	Prüfstand	75		-	-	500	-	
Sachsen-Anhalt	in Betrieb	130	110	1.000	500	-	-	
	Prüfstand	75		500	250	500	-	
Sachsen	in Betrieb	75		500		-	-	Dioxine/Furane
	Prüfstand	-		-		800	-	0,1 ng/m ³
BMU 11.06.2006	Prüfstand	50		250		-	-	Wirkungsgrad ~ 99 %

In den einzelnen Auswertungen erfolgte zunächst ein Technologievergleich für die im Projekt untersuchten Feuerungsanlagen bzw. Brennstoffe und anschließend ein Vergleich der Ergebnisse der **Besten Verfügbaren Techniken (BVT)**.

3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Strohfeuerungsanlagen bzw. neuartigen Anlagen

Die Ergebnisse der untersuchten Strohfeuerungsanlagen zeigen, dass ein störungsfreier Betrieb weitestgehend gewährleistet werden kann. Hinsichtlich der erreichbaren Emissionswerte muss allerdings bezüglich der Aufbereitungsform, dem konkret eingesetzten Material bzw. der Anlagentechnologie sowie der Leistungsklasse stark differenziert werden. Die Aufbereitung mittels Ballenauflöser sowie die Beschickung über Schneckensysteme bzw. eine pneumatische Zuführung und Zellenradschleusen funktionierte reibungslos.

3.1.1 Anlagen im Leistungsbereich < 50 kW

Die in diesem Anlagenbereich untersuchte Kesselanlage (HKRST 30/3 der Firma Reka A/S) ist in einem landwirtschaftlichen Betrieb aufgebaut und dient der Beheizung von Wohn- und Wirtschaftsräumen. Sie wurde zur Verwertung von Mindergetreide, welches bei der Saatgutaufbereitung anfällt, bzw. weiterer Schadpartien errichtet. Für diese Praxisanlage muss festgestellt werden, dass insgesamt ein ungünstiges Betriebsregime des Heizkessels besteht. Ein relativ häufiges Schaltspiel mit An- und Abfahrvorgängen führt zur Kondensation von Abgaskomponenten im Rauchgasweg. Gleichzeitig verursacht der erhöhte Aschegehalt der Strohpellet- und Getreidebrennstoffe in Verbindung mit hohen Verbrennungstemperaturen massive Ablagerungen in allen Baugruppen (Brennraum, Nachbrennraum, Türen sowie Wärmeüberträger). Die zu beobachtende Verschlackung beim Einsatz von Winterweizenkörnern (WW RB) führte zu keinen gravierenden Betriebsstörungen. Wintergerstenkörner (WG RB) neigen aufgrund der höheren Ascheschmelzpunkte kaum zur Schlackebildung. Wenig und nur lokal gebildete Schlacke zerfiel bei geringer mechanischer Beanspruchung. Eine gute Einstellung dieser Anlage, verbunden mit geringen CO-Emissionen ist in der Praxis ohne entsprechende Messtechnik und geschultes Personal kaum zu leisten. Nach erfolgter Optimierung konnten dies bei Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) nachgewiesen werden. Einzig die eingesetzten Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) zeigten hinsichtlich einer möglichst vollständigen Verbrennung Nachteile gegenüber den anderen Referenzbrennstoffen und bestätigen damit allgemeine Beobachtungen früherer Messkampagnen [12/], dass Strohpellets an Kleinfeuerungsanlagen deutlich höhere Anforderungen an den Kessel stellen, als das homogenere Getreide. Die starke Staubentwicklung führte hier zu einem schnellen Zusetzen des Wärmetauschers (s. Abb. 38).. Darüber hinaus wurde nach Abschluss der Messreihe festgestellt, dass die Düsenlanze der Sekundärluftzufuhr beschädigt war, was wesentlich höhere CO-Emissionen zur Folge hatte (s. Abb. 38 und 39). Dies ist auf häufige Taupunktunterschreitungen und den Einsatz nicht geeigneter Brennstoffe während der Phasen zwischen den Emissionsmessungen mit den Referenzbrennstoffen zurückzuführen.



Abbildung 38: Blick in den Feuerraumraum (links), den Wärmetauscher (mitte) und beschädigte Düsenlanzen (rechts) des Reka HKRST 30/3

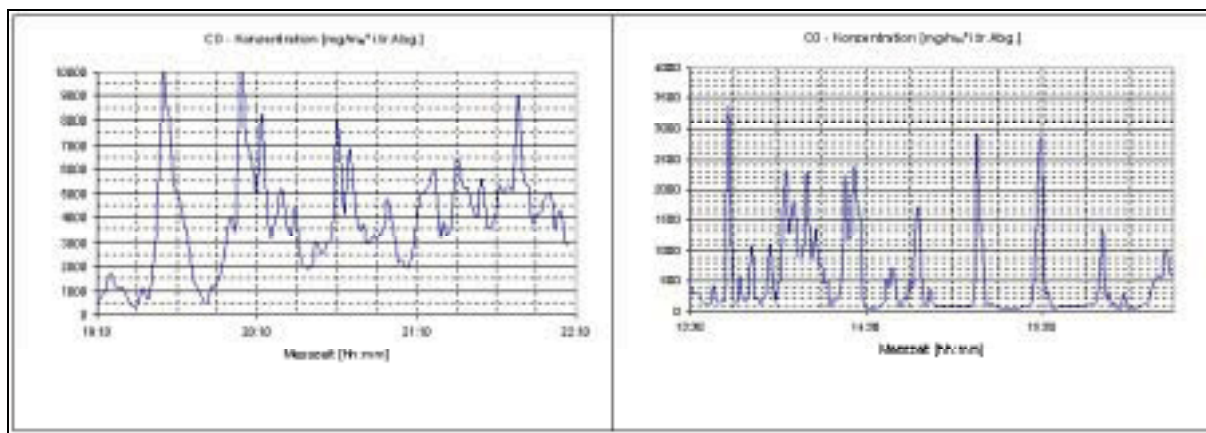


Abbildung 39: CO-Emissionen bei der Verbrennung von Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) defekter (links) und neuwertigen Düsenlanzen (rechts)

Der Einfluss dieser Schädigung auf die Ergebnisse konnte nicht abschließend geklärt werden, zeigt aber die Notwendigkeit der Kontrolle der Feuerungstechnologie im Praxisbetrieb im Rahmen der täglichen bzw. wöchentlichen Wartungsarbeiten.

Die Verschlackungsneigung ist bei dieser Feuerungstechnologie beim Einsatz von Strophpelletchargen stark ausgeprägt (s. Abb. 40). Das führt, neben dem Fehlen einer automatische Entschung, zu einem höheren Zeitaufwand für die Betreuung der Anlage.



Abbildung 40: Schlacke von Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) mit unterschiedlichen Mineralgehalten

Die in den Abbildungen 40 und 41 dargestellten Ergebnisse zeigen ein relativ homogenes Verbrennungsverhalten mit mittleren CO-Werten von $300 \pm 30 \text{ mg/Nm}^3$ bei 11 % O_2 bzw. Cges-Werten von $30 \pm 4 \text{ mg/Nm}^3$ bei 11 % O_2 beim Einsatz der Getreidekörnerchargen (WG / WW RB) in der Kleinf Feuerungsanlage der Firma Reka, Typ HKRST 30. Das bestätigt frühere Messungen an einer vergleichbaren Anlage [2/] und verdeutlicht die generelle Genehmigungsfähigkeit solcher konventioneller Anlagentechnologien für halmgutartige Biobrennstoffe. Es werden gleichzeitig die höheren Immissionspotenziale weniger geeigneter Strohpelletqualitäten deutlich.

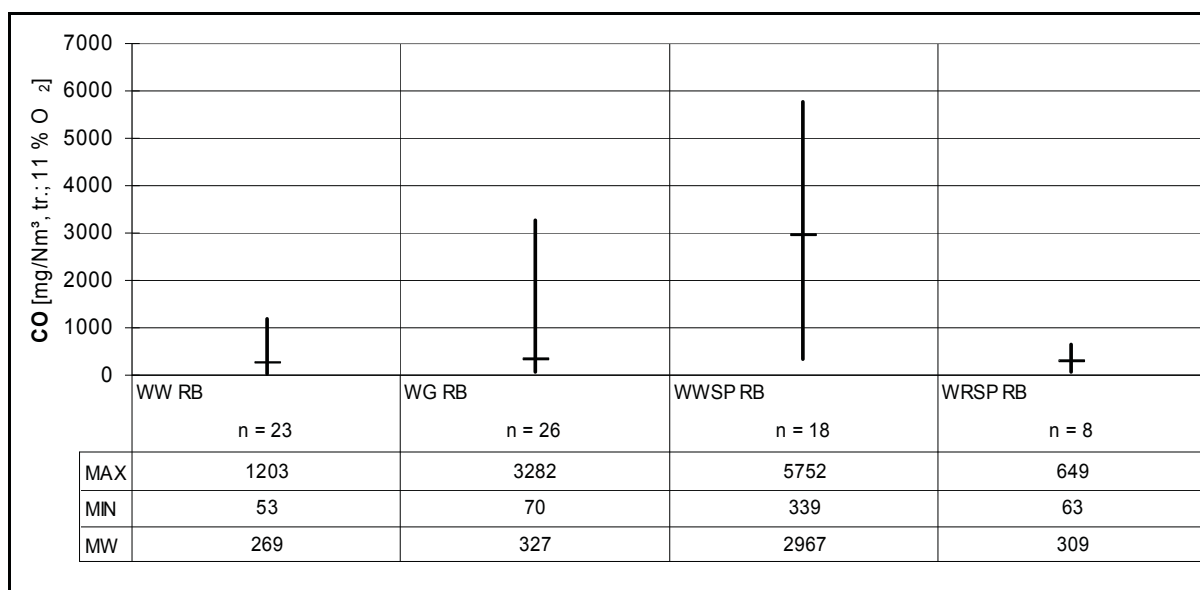


Abbildung 41: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

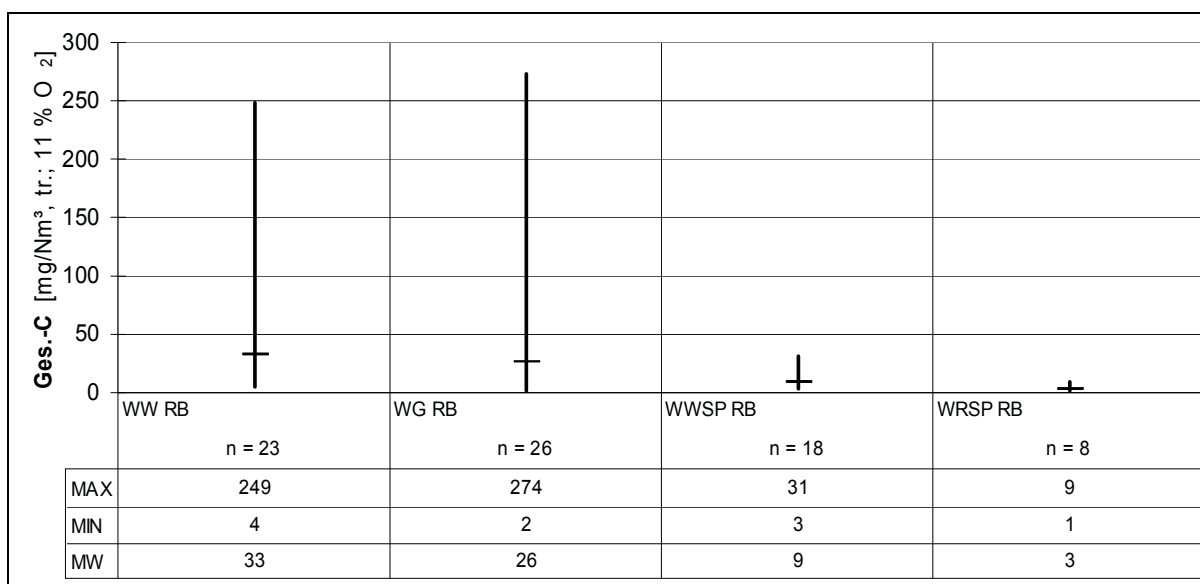


Abbildung 42: Vergleich der Gesamt-Kohlenstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die Abbildungen 43 bis 45 verdeutlichen die Abhängigkeit der Stickoxid-, Chlor bzw. Schwefeldioxidemissionen von den Brennstoffinhaltsstoffen.

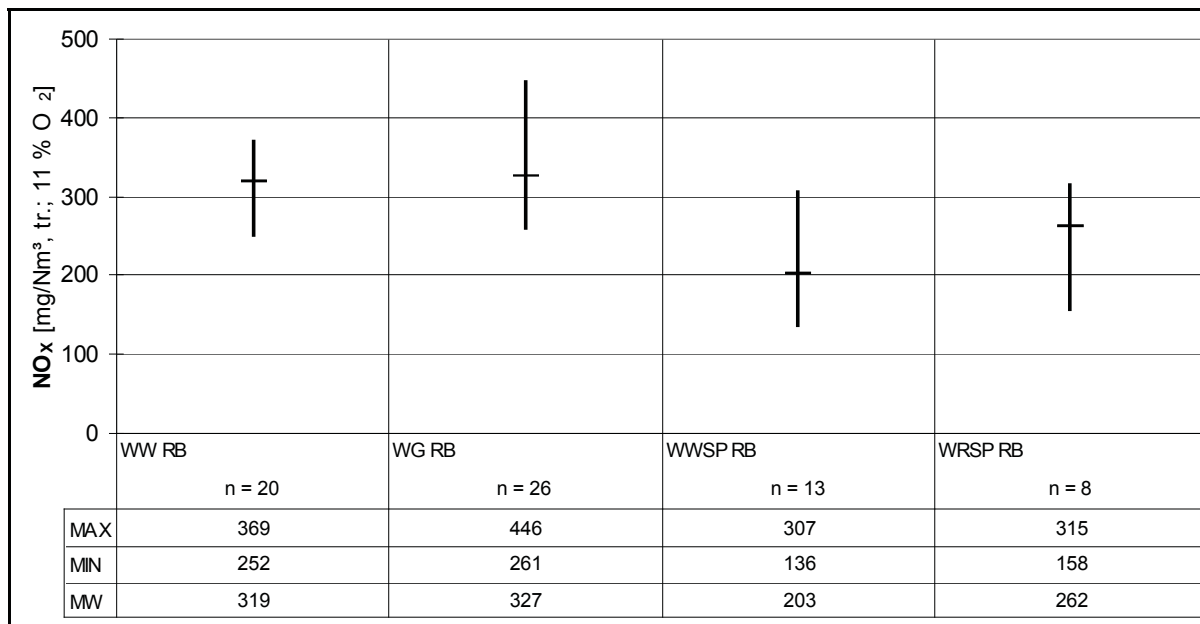


Abbildung 43: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

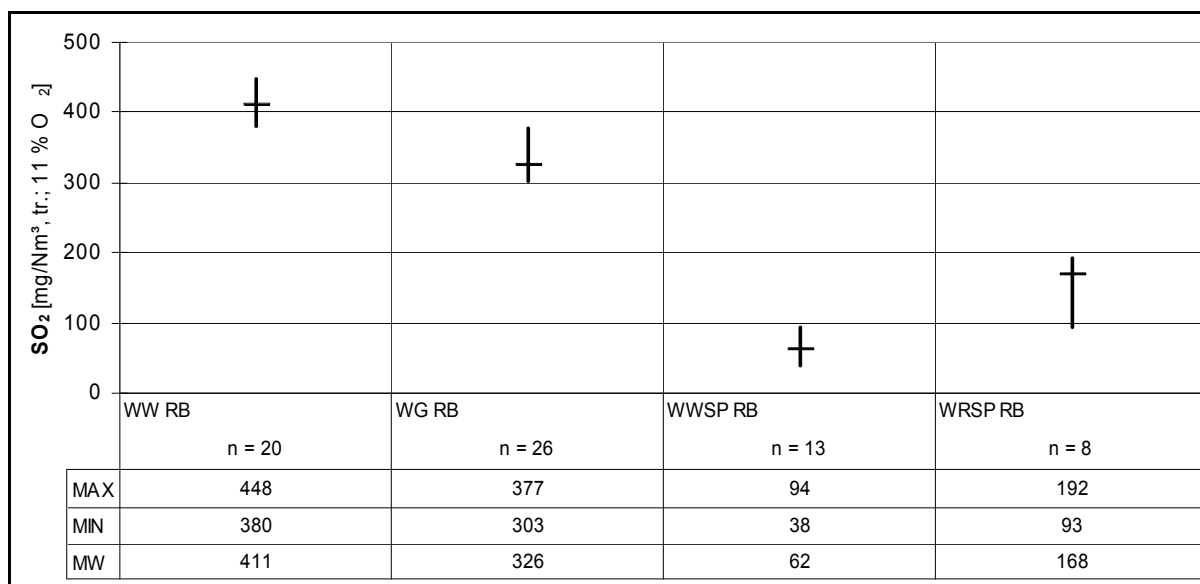


Abbildung 44: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

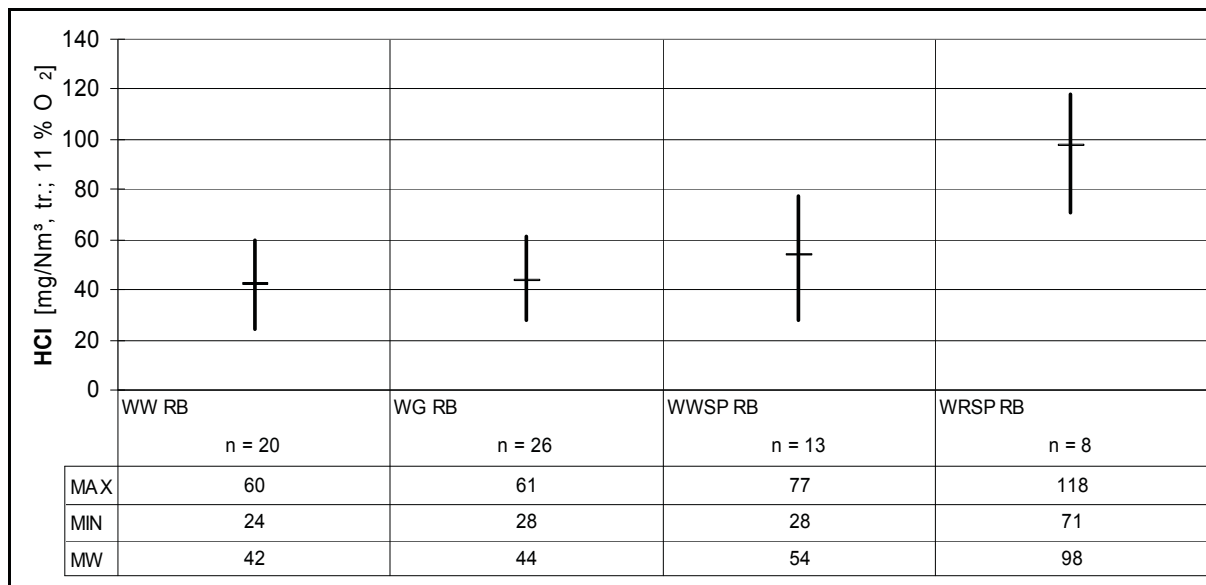


Abbildung 45: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

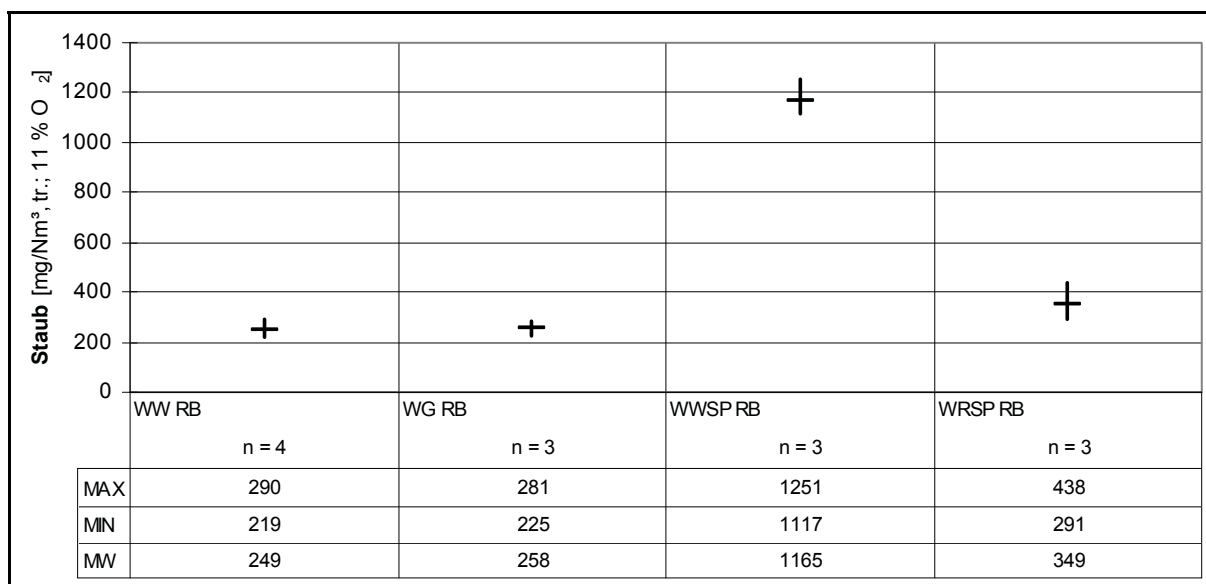


Abbildung 46: Vergleich der Staubkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Legt man für eine Bewertung dieser brennstoffspezifischen Emissionskomponenten die Anforderungen der Grenzwerte der TA Luft zu Grunde, wird deutlich, dass diese nicht bei allen Komponenten eingehalten werden können. Das betrifft insbesondere die HCl-Emissionen (vgl. Abb. 45), welche im Rohgas im Mittel um mehr als 40 % überschritten werden. Des Weiteren wurden bei allen Messungen im Rohgas die Staubgrenzwerte der 1. BImSchV (0,15 g/Nm³) überschritten (s. Abb. 46). Daher war ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen an dieser Anlagentechnologie die Adaption eines Filters. Die

Untersuchungen wurden komplett durch das ILK vorgenommen [1/]. Die Ergebnisse zur umgesetzten Abscheidetechnologie werden im Kapitel 3.2.1 vorgestellt.

Die Rohgas-Untersuchung der Anteile der Korngrößenfraktionen am Gesamtstaub ergab ein relativ einheitliches Bild. Typischer Weise sind über 90 % der Partikel dem Größenbereich PM 2,5 zuzuordnen. Der übrige Anteil gliedert sich auf die Fraktionen PM 10 > x > PM 2,5 und größer PM 10 auf. Dabei bestehen für die Fraktionsanteile innerhalb der beprobten Brennstoffe sowie innerhalb der Einzelmessungen keine nennenswerten Unterschiede.

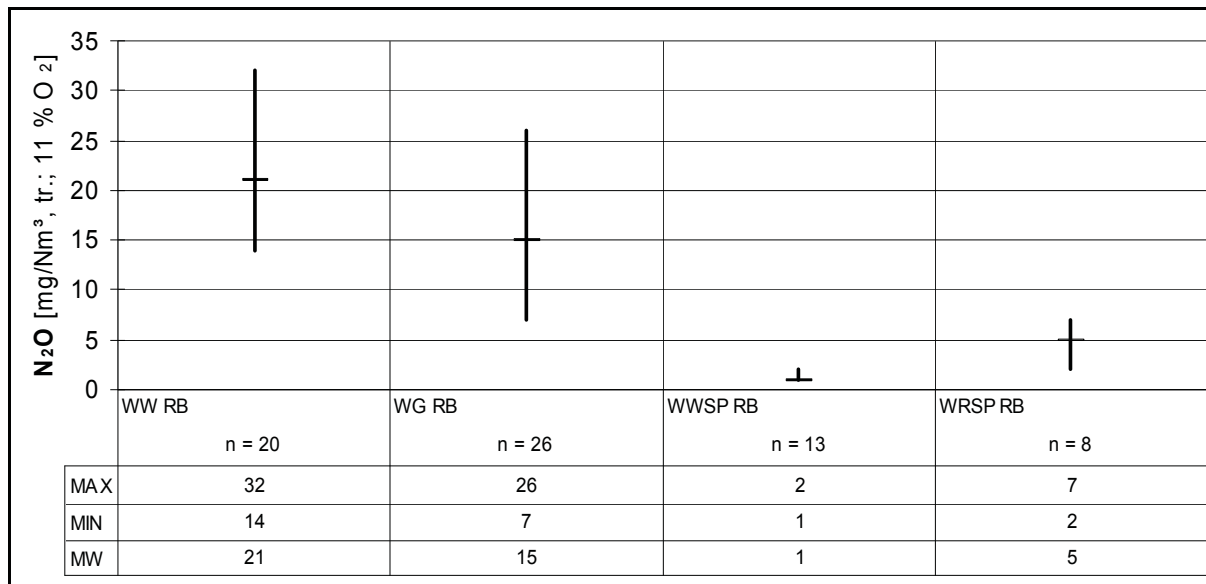


Abbildung 47: Vergleich der Distickstoffoxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Durch den Einsatz eines FTIR - Spektrometers konnte auch die Konzentration des Gases N_2O im Abgas quantifiziert werden (s. Abb. 47). Sie liegt bei den beprobten Strohpelletbrennstoffen mit maximal 7 mg/Nm^3 bei 11 % O_2 deutlich niedriger gegenüber den beiden Korbrennstoffen mit maximal 32 mg/Nm^3 bei 11 % Vol. O_2 . Die Bildung von Distickstoffoxid (Lachgas) ist noch nicht gänzlich erforscht. Es wird vermutet, dass aus stickstoffhaltigen Pyrolysegasen wie Aminen (NH_x) oder Cyanverbindungen (HCN) N_2O bei der Verbrennung entsteht. Die Bildung über den HCN - Pfad (bezeichnet als homogene N_2O - Bildung aus dem Stickstoff des Brennstoffs) gilt dabei als vorrangig. Als steigende Faktoren können Luftüberschuss bei der Verbrennung, der Stickstoffgehalt des Brennstoffs und niedrige Verbrennungstemperaturen genannt werden.

Bei Bewertung der Emissionskonzentrationen an PCDD/F nach TA Luft (Grenzwert: 0,1 ng/Nm³ bei 11 % Vol. O₂) ergeben sich einzelne Grenzwertüberschreitungen (s. Tab. 17, s. Abb. 48 bis 50), welche auf die ungenügende Verbrennungsqualität zurückzuführen sind (s. Abb. 41 und 42). Im Fall der ersten Messungen für WG RB werden auch Memory-Effekte [nach /39/] vermutet, da diese Praxisanlage im Vorfeld mit Sonderbrennstoffen betrieben wurde und es aufgrund der langen und verzweigten Messstrecke nur eine, den Umständen entsprechende, evtl. nur ungenügende Reinigung der Anlage im Vorfeld der Messungen möglich war.

Tabelle 17: Ergebnisse der PCDD/F Messungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Firma Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % O ₂)	Brennstoff	Wintergerste (WG B) (Rohgas)	Winterweizen (WW RB) (Rohgas)	Winterweizenstroh-pellets (WWSP RB)
Summe PCDD / PCDF				
ng I-TE/Nm ³ [GW: 0,1 ng I-TE/ Nm ³]	Messung 1	0,25	0,10	0,86 (Rohgas) ^{*)}
	Messung 2	0,13	0,08	0,20 (Reingas)
	Messung 3	0,09	0,07	0,19 (Reingas)
	MW	0,16	0,08	0,20 (Reingas)

^{*)} schlechte Verbrennungsbedingungen durch defekte Luftdüsen

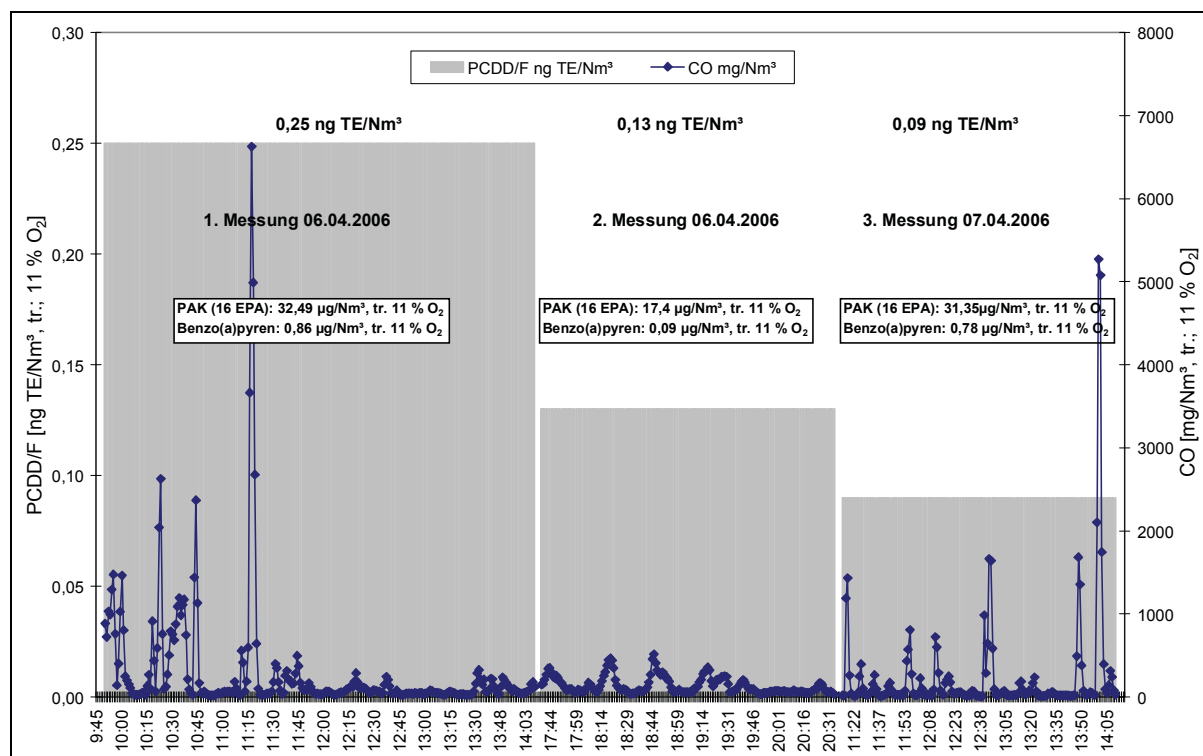


Abbildung 48: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Roh- und Reingas für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 6./7.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

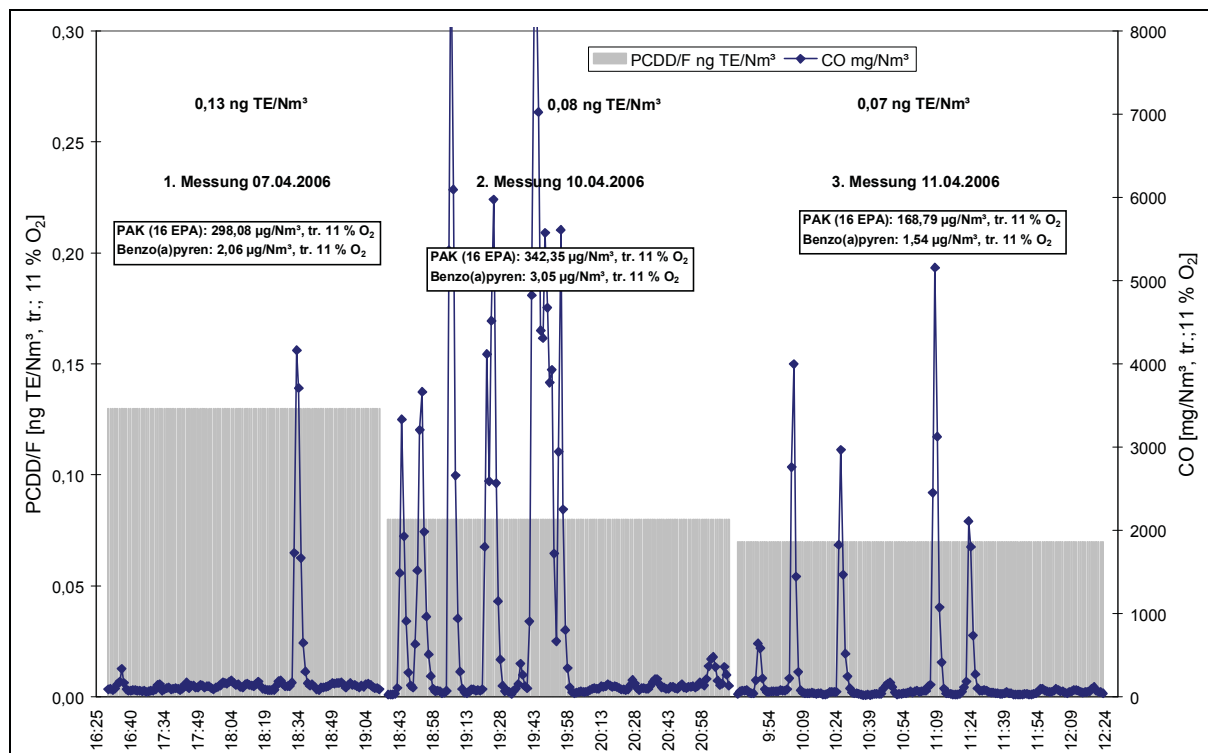


Abbildung 49: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Roh- und Reingas für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 7./10./11.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

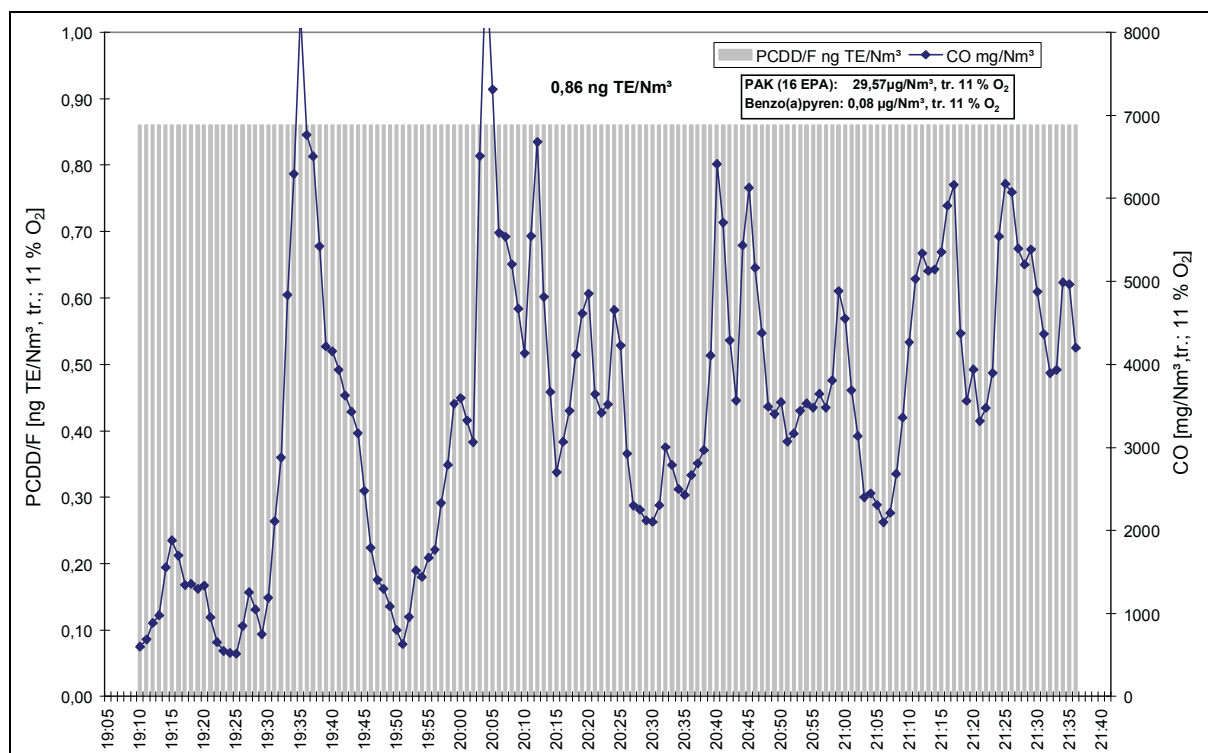


Abbildung 50: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Rohgas für den Referenzbrennstoff Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) 11.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Bei den Ergebnissen der Analysen der Emissionsparameter PAK bzw. Benzo(a)pyren kann klar zwischen den Brennstoffen unterschieden werden. Deutlich werden die um ca. Faktor 10 höheren Werte für Weizenkörner gegenüber Gerstenkörnern und um ca. Faktor 100 höheren Werte gegenüber Winterweizenstroh. Der in diesem Zusammenhang entsprechende Grenzwert der TA Luft für die Leitkomponente Benzo(a)pyren wird jedoch selbst im schlechtesten Fall mindestens um 94 % unterschritten (s. Tab. 18).

Tabelle 18: Ergebnisse der PAK Messungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Fa. Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % O ₂)	Brennstoff	Wintergerste (WG B) (Rohgas)	Winterweizen (WW RB) (Rohgas)	Winterweizenstroh-pellets (WWSP RB)
PAK (16 nach EPA) µg /Nm ³ [GW: Benzo(a)pyren als Tracer, 50 µg / Nm ³]	Messung 1	32,5	298	29,6 (Rohgas) ^{*)}
	Messung 2	17,4	342	2,6 (Reingas)
	Messung 3	30,5	167	3,1 (Reingas)
	MW	26,8	269	2,9 (Reingas)

^{*)} schlechte Verbrennungsbedingungen durch defekte Luftdüsen

Tabelle 19: Ergebnisse der Benzo[a]pyrenmessungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Fa. Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % O ₂)	Brennstoff	Wintergerste (WG B) (Rohgas)	Winterweizen (WW RB) (Rohgas)	Winterweizenstroh-pellets (WWSP RB)
Benzo[a]pyren µg /Nm ³ [GW: 50 µg / Nm ³]	Messung 1	0,86	2,06	0,08 (Rohgas) ^{*)}
	Messung 2	0,09	3,05	< 0,1 (Reingas)
	Messung 3	0,78	1,54	< 0,2 (Reingas)
	MW	0,58	2,20	< 0,15 (Reingas)

^{*)} schlechte Verbrennungsbedingungen durch defekte Luftdüsen

Die Messungen im Rohgas für den Schadstoff Benzen (Benzol) ergaben für die gemessenen Referenzbrennstoffe ebenfalls Werte deutlich unterhalb des TA-Luft Grenzwertes von 1 mg/Nm³ bei 11 % Vol. O₂. Die relativ hohe Schwankungsbreite von Werten kleiner der Nachweisgrenze bis 0,5 mg/Nm³ bei 11 % Vol. O₂ weist, wie auch bei PCDD/F und PAK, auf die Abhängigkeit von der Abbrandqualität hin. Jedoch ist brennstoffabhängig auch bei vergleichsweise schlechter Verbrennungsqualität (siehe Versuch mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets; vgl. Abb. 50) ein Wert unterhalb der Nachweisgrenze feststellbar.

Es wird eingeschätzt, dass sich für Messungen im Abscheiderbetrieb kein Einfluss auf die Emissionskonzentrationen von PCDD/F, PAK oder Benzol ergibt, da die Emissionshöhe für die genannten Parameter im Wesentlichen vom Brennstoff sowie der Verbrennungsqualität abhängt.

Tabelle 20: Ergebnisse der Benzolmessungen (Rohgas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Fa. Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % O ₂)	Brennstoff	Wintergerste (WG B) (Rohgas)	Winterweizen (WW RB) (Rohgas)	Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) (Rohgas)
Benzol mg /Nm ³ [GW: 1 mg / Nm ³]	Messung 1	< 0,01	< 0,01	< 0,01 ^{*)}
	Messung 2	0,25	< 0,01	-
	Messung 3	0,48	0,28	-
	MW	< 0,25	< 0,1	-

^{*)} schlechte Verbrennungsbedingungen durch defekte Luftdüsen

3.1.2 Anlagen im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 kW

Der in diesem Leistungsbereich untersuchte Kessel stammt von der Firma Reka (Typ HKRST 60) mit einer Nennwärmeleistung von 54 kW. Diese Anlage ist mit einem Reka-Ballenauflöser für die Auflösung der Strohballen zu Strohäcksel ausgerüstet. Diese werden über ein Schneckensystem bzw. einer Zellenradschleuse dem Feuerraum zugeführt. Es wurde an dieser Anlage ausschließlich der Referenzbrennstoff Winterweizenstroh untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen an dieser Anlagentechnologie war die Adaption eines Elektrofilters. Die Untersuchungen wurden komplett durch das ILK vorgenommen [1/].

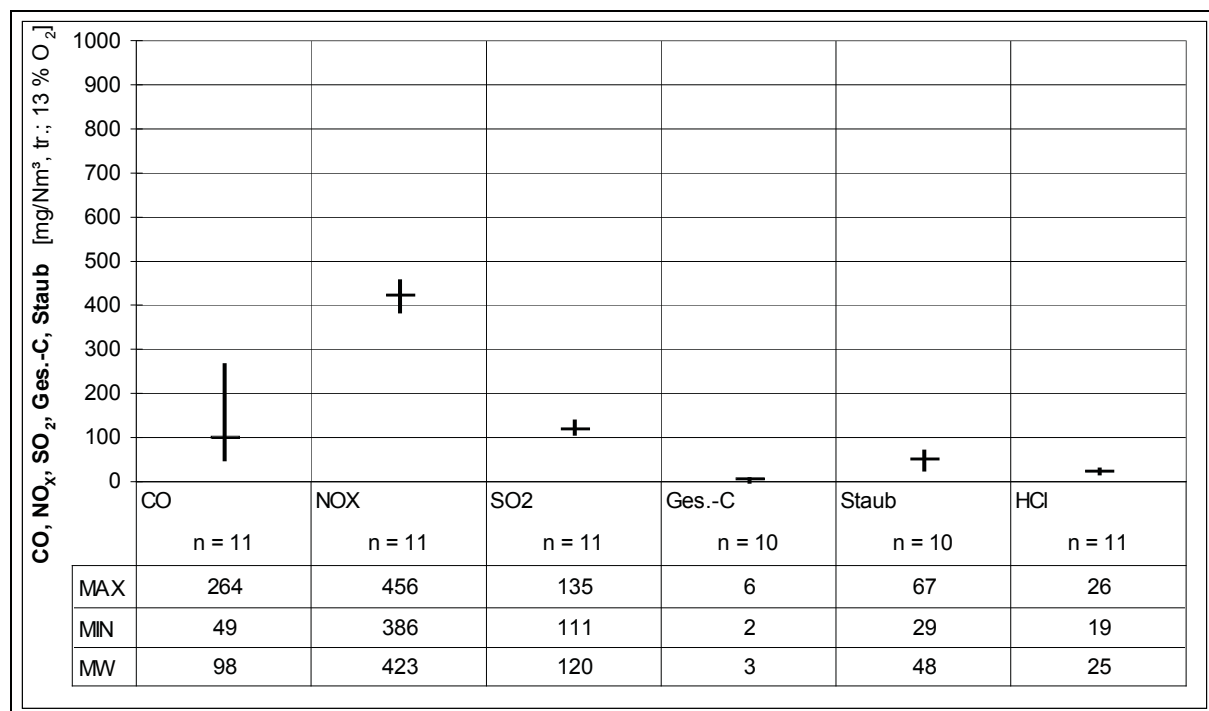


Abbildung 51: Ergebnisse der kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Schwefeldioxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohäcksel (WWSH RB) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Vergleicht man die in Abbildung 51 dargestellten Emissionsergebnisse mit denen der Strohpellets, die in der Reka-Anlage kleinerer Leistung untersucht worden sind (vgl. Kapitel 3.1.1), ist auch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Darstellung (hier: Viertelstundenmittelwerte, 13 % Vol. O₂), ein deutlich besseres Abbrandverhalten der Strohhäcksel festzustellen, welches mit dem von Getreidekörnern vergleichbar ist. Bei mehrfachen Wiederholungen (n = 10) der Rohgas-Staubmessung konnte ein Wert von 100 mg/m³ bei allen Messungen deutlich unterschritten werden. Das übertraf die Erwartungen bei weitem (vgl. [2/, /40/]) und bestätigt zugleich die Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV. Auch die anderen Abgaskomponenten SO₂, Ges.-C und HCl, legt man selbst die höheren Anforderungen für 4. BImSchV Anlagen [41/] und damit potentielle Anforderungen der TA Luft zugrunde, unterschreiten deutlich die dort gestellten Anforderungen. Die Parameter SO₂ und HCl sind vorrangig durch die im Brennstoff enthaltenen Mengen der Elemente Schwefel und Chlor bestimmt.

Zur Beurteilung der Fraktionsanteile im Gesamtstaub wurden Impaktormessungen durchgeführt. Hierbei kamen 2 verschiedene Messverfahren zum Einsatz - ein Niederdruckimpaktor nach Prof. Berner und ein Impaktor „Jonas II“ gemäß VDI 2066 Blatt 10 der Firma Gothe. Die Messungen mit dem dreistufigen Impaktor nach VDI 2066 Blatt 10 ergaben, dass im Rohgas etwa 94 % des Staubes in die Fraktion PM 2,5 einzuordnen ist (s. Abb. 52).

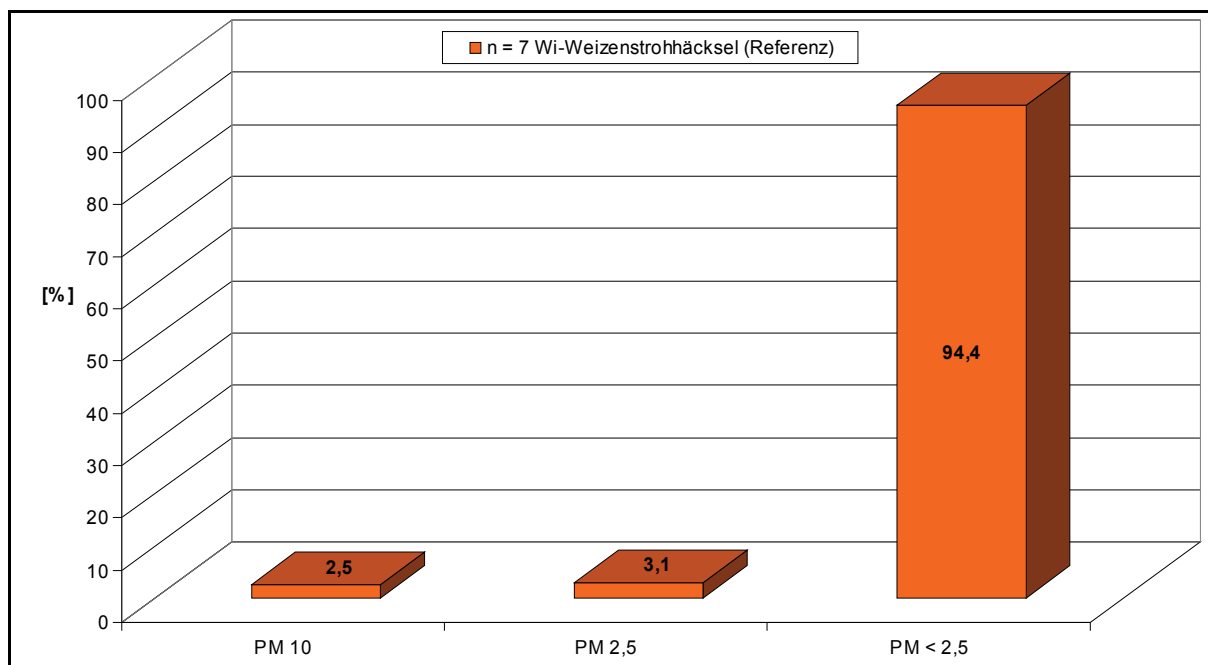


Abbildung 52: Ergebnisse der Feinstaubmessungen (Rohgas) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhäcksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; angegeben in %; Korngrößenverteilung hier dargestellt als PM 10 (Partikel > 10 µm); PM 2,5 (Partikel 2,5 < x ≤ 10 µm); PM < 2,5 (Partikel ≤ 2,5 µm)

Trotz einer Senkung dieses Anteils im Abscheiderbetrieb auf rd. 78 % besitzt diese Größenfraktion ultrafeiner Partikel den größten Anteil der Gesamtstaubmasse im Rauchgas. Mit dem Niederdruckimpaktor nach Berner kann die Auflösung in Partikelfractionen noch wesentlich erweitert werden (s. Abb. 53).

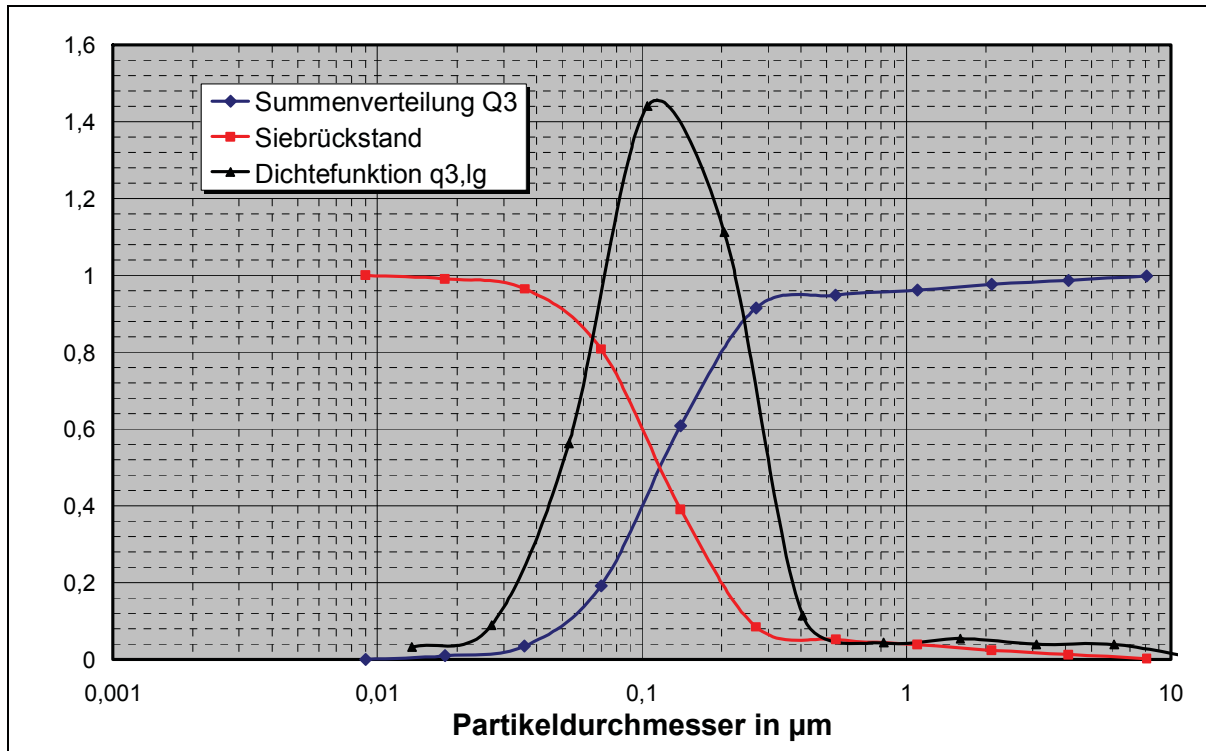


Abbildung 53: Partikelgrößenverteilung – Niederdruckimpaktor

Es wird deutlich, dass das Maximum mit 0,1 bis 0,2 µm weit unter 2,5 µm liegt. Die gewonnen Messergebnisse können als typisch für Biomassefeuerungen bezeichnet werden. Das Untersuchungsprogramm wurde ergänzt durch jeweils zwei orientierende Bestimmungen der PCDD/F, PAK (16 EPA) bzw. Benzo(a)pyren-Emissionen im Rohgas bei Teillastbetrieb (s. Tab. 21) sowie im Reingas bei Volllastbetrieb (s. Tab. 22).

Tabelle 21: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas/Teillast) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % Vol. O ₂)	Dimension	Messung 1	Messung 2
Summe PCDD/F	ng I-TE/Nm ³	0,11	0,04
PAK (16 nach EPA)	µg / Nm ³	206,5	247,1
Benzo(a)pyren	µg / Nm ³	8,6	6,8

Der Heizkessel wurde aufgrund der spezifischen Wärmeabnahmesituation während der Rohgasmessungen im intermittierenden Teillastbetrieb in Intervallen von ca. 30 min betrieben (s. Abb. 54).

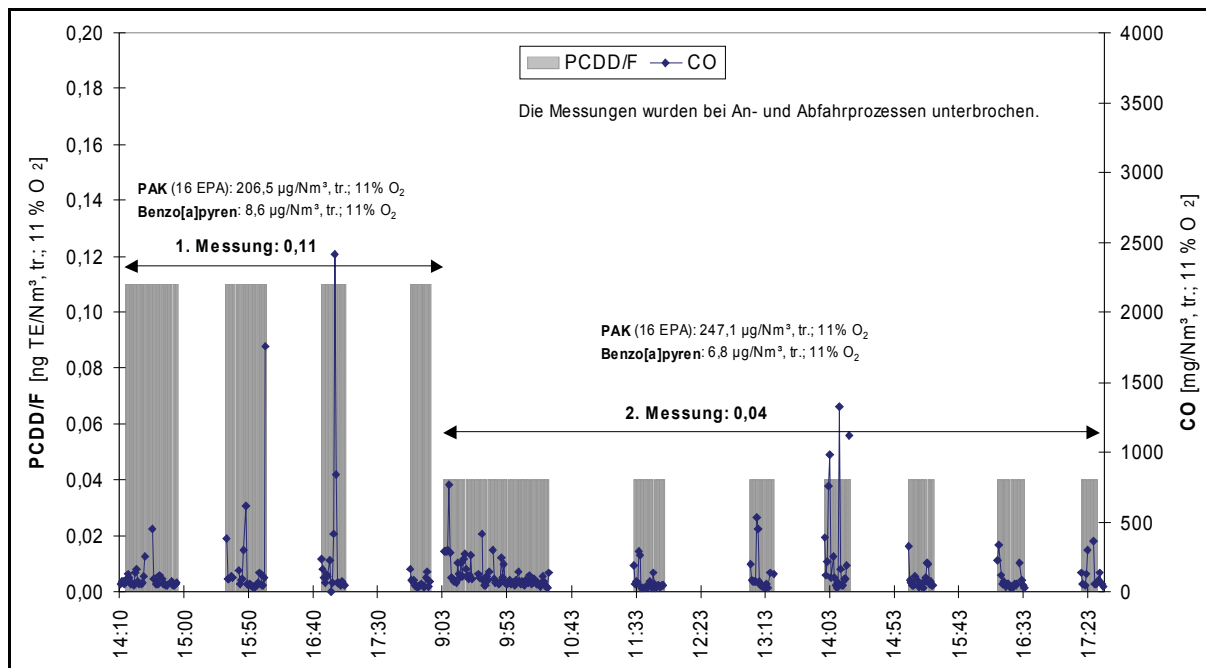


Abbildung 54: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas/Teillast) in Abhängigkeit der CO-Emissionen im intermittierenden Betrieb für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Bereits während der Teillastuntersuchungen konnten die geringen Staubemissionen der Anlage sowie eine günstige Anlageneinstellung (CO) nachgewiesen werden. Eine Glühverlustbestimmung wies Werte von durchschnittlich kleiner 1,2 % aus. Die Ermittlung der Emissionskonzentration für die hochtoxischen Rauchgasinhaltsstoffe PCDD/F zeigte keine erhöhten Werte. Der Grenzwert von 0,1 ng/Nm³ wurde selbst für diese ungünstige Betriebsweise nicht überschritten.

Tabelle 22: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas/Volllast) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % Vol. O ₂)	Dimension	Messung 1	Messung 2
Summe PCDD/F	ng I-TE/Nm ³	0,05	0,02
PAK (16 nach EPA)	µg / Nm ³	118,8	49,5
Benzo(a)pyren	µg / Nm ³	0,9	0,2

Bei den späteren Messungen im Abscheiderbetrieb unter Vollastbedingungen wurden ausschließlich Emissionskonzentrationen deutlich unterhalb des nach TA-Luft geforderten Grenzwertes ermittelt (s. Tab. 22). Sowohl die Werte für die Leitkomponente Benzo(a)pyren (TA Luft Grenzwert: 50 µg/Nm³ bei 11 % Vol. O₂), als auch die Werte für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) liegen im Vollastbetrieb deutlich niedriger als im Teillastbetrieb.

Die Verbrennung von Strohhäckseln in der Kleinfeuerungsanlage vom Typ HKRST 60 der Firma Reka brachte sehr gute Ergebnisse von bisher nicht nachgewiesener Qualität für diese Art von Brennstoff und in dieser Anlagengröße. Die Brennstoffbeschickung vom Ballenteiler bzw. -auflöser über die Schnecken bis hin zur Zuführung des Brennstoffes über eine Zellenradschleuse arbeitet zuverlässig. Die teilweise entstehenden Schlackeanteile (s. Abb. 55) in der Asche führten zu keinerlei Beeinträchtigung des automatischen Betriebes. Da der Kessel nicht über eine automatische Entaschung verfügt, ist der Zeitaufwand für die Anlagenbetreuung etwas erhöht. Die deutlich erhöhten Investitionen für einen Strohballeinteiler in dieser Form (Garantie wird von der Firma Reka nur in Kombination mit ihrem Ballenauflöser gegeben!) stellen für diese Anlagengröße die Gesamtwirtschaftlichkeit im untersuchten Leistungsbereich in Frage, speziell wenn diese ohne Förderung etabliert werden muss.



Abbildung 55: Feuerraumasche nach Verbrennung von Winterweizenstroh (Häcksel) – WWSH RB im Reka HKRST 60

3.1.3 Anlagen im Leistungsbereich zwischen 100 kW und 1 MW

In diesem Leistungsbereich liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen zum einen auf einem Strohballenvergaser der Firma Herlt (D) mit einer Nennwärmeleistung von 145 kW (HSV 145) und einer Brennmuldenfeuerungsanlage der Firma LINKA (DK) mit einer Nennwärmeleistung von 400 kW (H 400). Der Strohballenvergaser am Standort Wiesenburg/Wildenfels in Sachsen wurde emissionsseitig umfangreich von der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft (UBG) untersucht [/6/ bis /8/]. Die in Abbildung 56 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass diese Anlage neben den im Mittel sehr guten Emissionswerten Probleme bei der Einhaltung des nach TA Luft geforderten Staubgrenzwertes von 50 mg/Nm³ (bezogen auf 11 % Vol. O₂) aufweist.

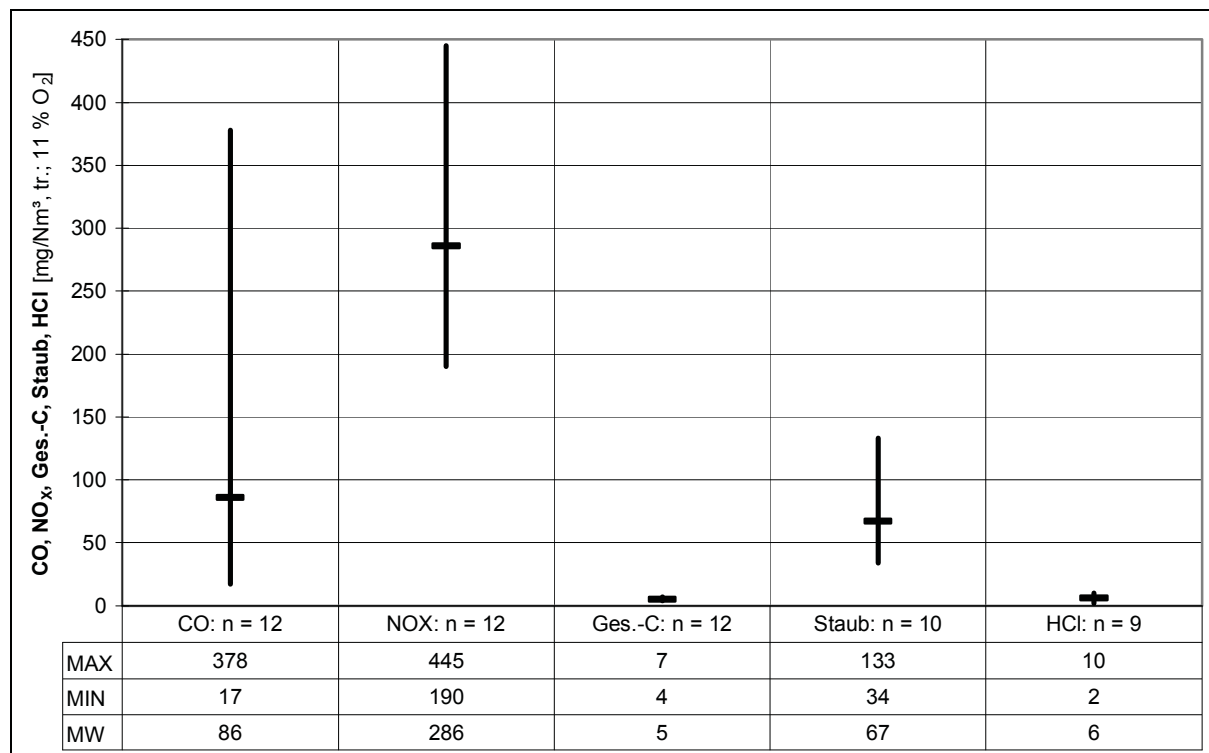


Abbildung 56: Ergebnisse der kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für den Brennstoff Winterweizenstroh in Form von Rundballen - Standort Wildenfels – Erhebung von Praxisdaten am HSV 145 [/7/]; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Im Rahmen von einem in Bayern durchgeführten Projektes zur Entstaubung einer Holzfeuerungsanlage wurden sehr positive Effekte hinsichtlich der Abscheidung der entstehenden Stäube nachgewiesen. In Absprache mit den Bearbeitern und den Entwicklern dieser Anlagentechnik wären ähnlich gute Effekte beim Einsatz an der Strohvergasungsanlage in Wiesenburg zu erwarten. Eine Absprache zu den technischen, wirtschaftlichen und emissionsrechtlichen Details erfolgte Anfang Dezember 2005 mit den Verantwortlichen vor Ort. Dort wurde des Weiteren über eine auf andere Anlagen und Leistungsbereiche adaptierbare Abscheidetechnik diskutiert. Eine anschließende

Entwicklung einer solchen Technik war, aufgrund der stark reduzierten Finanzmittel des Unterauftragnehmers ILK im Projekt der TLL, jedoch nicht umsetzbar. Es wurde daher im Rahmen des Projekt des WKI (s. Kapitel 4, /15/) durch das ILK eine derartige Entwicklung und Etablierung vorgeschlagen und umgesetzt.

Im Hinblick auf die Einschätzung des Staubemissionsverhaltens des Ganzballenvergasers der Firma Herlt muss festgestellt werden, dass für die hohen Anforderungen (TA Luft) für diesen Leistungsbereich bisher keine wirtschaftlich darstellbare Staubabscheidung zur Verfügung steht. Mehrere Ansätze dieses Problem zu lösen, führten bislang nicht zu einem zielführenden Ergebnis. Beim Einsatz von Anlagen diesen Typs im kleineren Anlagenbereich ($< 100 \text{ kW}$) ist die Technik jedoch als praxisnahe Möglichkeit der Wärmeerzeugung unter den gegenwärtigen rechtlichen Rahmenbedingungen einzuschätzen. Nachteile für den Betreiber liegen in der diskontinuierlichen Beschickung sowie dem Fehlen einer automatischen Zündung sowie einer kontinuierlichen Entaschung, welche einen deutlich höheren Personalaufwand zur Folge haben.

Schwerpunkt der Versuche an der 400 kW Brennmuldenfeuerung der Fa. LINKA am Standort Seedorf bildete die Ermittlung der Qualität des Ausbrandes für diese Anlagentechnik (s. Abb. 57), die Bestimmung der Staubemissionen im Roh- bzw. Reingas (s. Abb. 58), sowie die Charakterisierung des Feinstaubanteils (s. Abb. 59). Als Brennstoffe wurden Winterweizen- und Triticalestroh verwendet. Es handelt sich bei diesen Brennstoffen nicht um Referenzbrennstoffe da aufgrund des frühen Versuchsbeginns, der wenig aussichtsreichen Ergebnisse der Versuche und der zu großen benötigten Mengen deren Einsatz als nicht sinnvoll eingeschätzt wurde.

Die in Abbildung 57 dargestellten Schwankungsbreiten der CO-Emissionen zeigen einen in Bezug auf die Einhaltung der Grenzwerte nur ungenügenden Ausbrand für beide eingesetzten Strohsorten. Der in der TA Luft aufgeführte Emissionswert ($0,25 \text{ g/Nm}^3$ bei 11 \% Vol. O_2) wird um ein Vielfaches überschritten, so dass die prinzipielle Eignung dieser Anlage für den Brennstoff Stroh in diesem Leistungsbereich in Frage gestellt werden muss. Umfangreiche Versuche durch den Betreiber, diese Anlage emissionsseitig zu optimieren, führten nicht zum Erfolg. Auch die angestregten Bemühungen vom Hersteller der Anlage Unterstützung zu bekommen, scheiterten. Die Emission der sauren Abgaskonzentrationen HCl und SO_2 sind relativ gering und liegen im Mittel unter 5 (HCl) bzw. $20 \text{ (SO}_2\text{) mg/Nm}^3$ bei 11 \% Vol. O_2 .

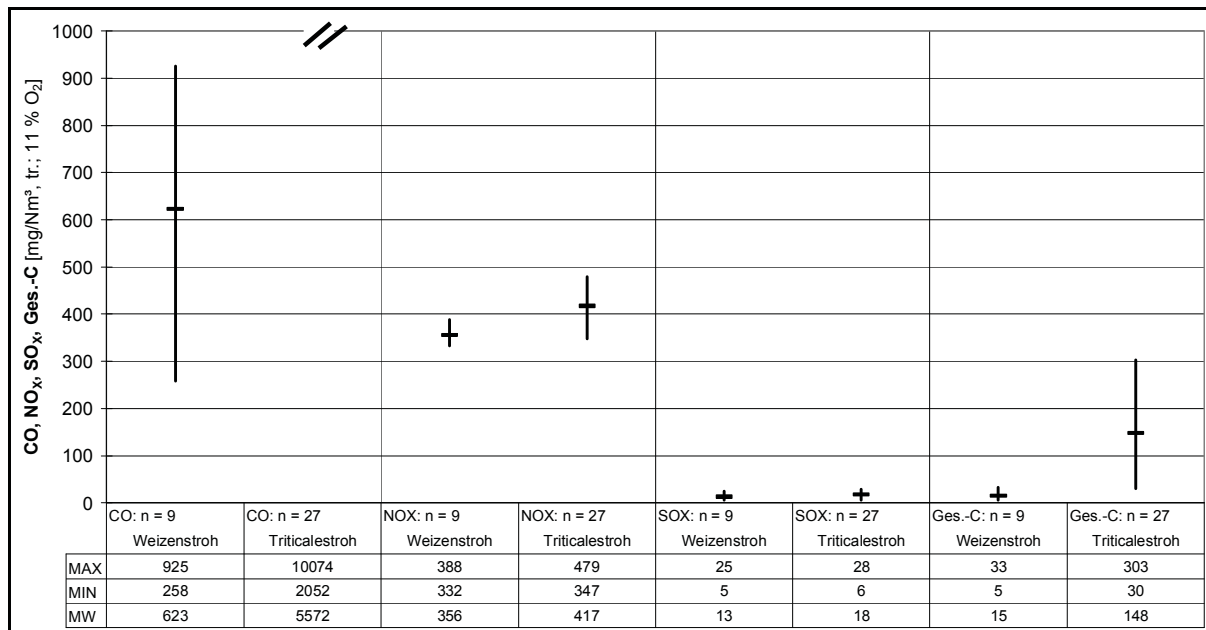


Abbildung 57: Vergleich der Ergebnisse der kontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Schwefeldioxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh in Form von Strohhäcksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Der eingesetzte Gewebefilter der Firma Deichmann kann dagegen selbst bei ungenügendem Ausbrand eine sichere Einhaltung des geforderten Staubgrenzwertes leisten (s. Abb. 58). Er ist mit patronenförmigen Filterelementen ausgerüstet (Metallgestrick/ Metallgewebe). In Abhängigkeit der als Brennstoff verwendeten Strohsorten werden diese allerdings unterschiedlich stark belastet. Auffällig sind die sehr hohen Rohgasstaubwerte, besonders bei Triticalestroh, welche u.a. auf den sehr schlechten Ausbrand und die damit verbundenen hohen Anteile unverbrannten Materials zurückzuführen sind. Der Abscheider wies bei der im Rahmen der Messungen mit durchgeführten Sichtprüfungen starke Verkrustungen auf der Rohgasseite auf, welche die Abreinigungswirkung einschränkte. Die Abreinigung durch Druckluftimpulse erfolgte mit hohem Kesseldruck bei Dauerabreinigung, was einen erhöhten Staubdurchtritt am Filterelement und einen hohen Gesamtenergieverbrauch des Abscheiders zur Folge hat. Der Betrieb des filternden Abscheiders ist im hohem Maß von der Verbrennungsführung abhängig.

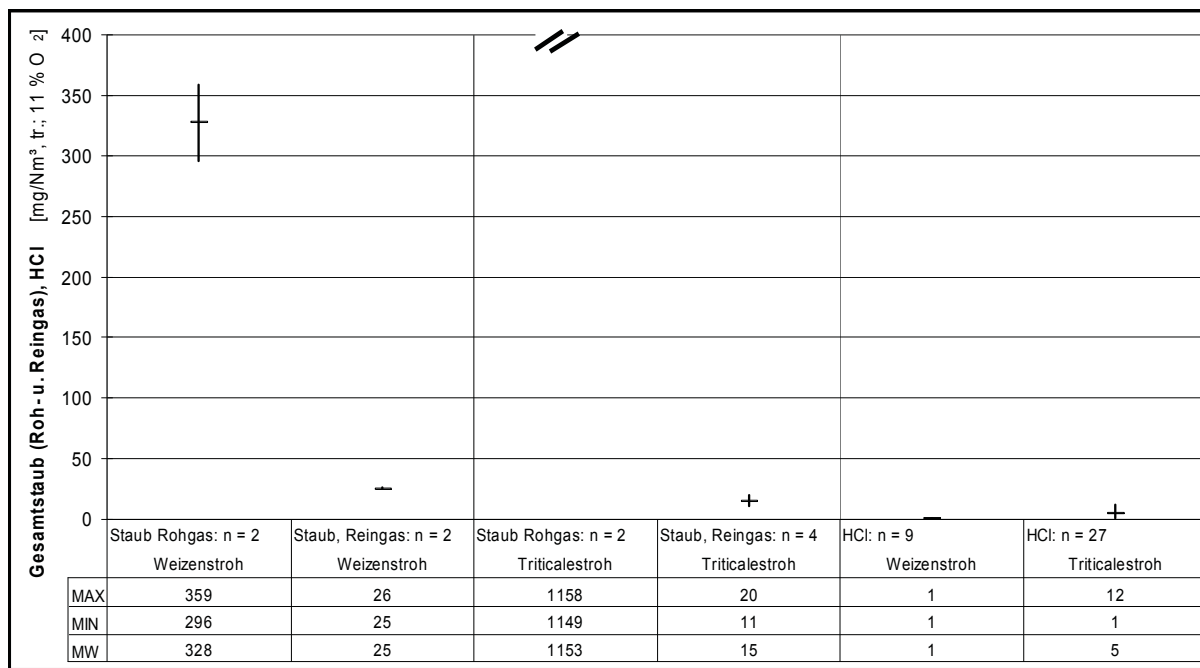


Abbildung 58: Vergleich der Ergebnisse der Staubkonzentrationen gemessen im Rein- und Rohgas für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Bei der Bestimmung der Feinstaubfraktionen wurden ähnliche Zusammensetzungen der Korngrößenfraktionen festgestellt, wie bei der Reka-Strohfeuerungsanlage (s. auch Abb. 9). Auch hier macht die Fraktion PM 2,5 mit Anteilen von über 80 bzw. 95 % den Hauptanteil aus (s. Abb. 59).

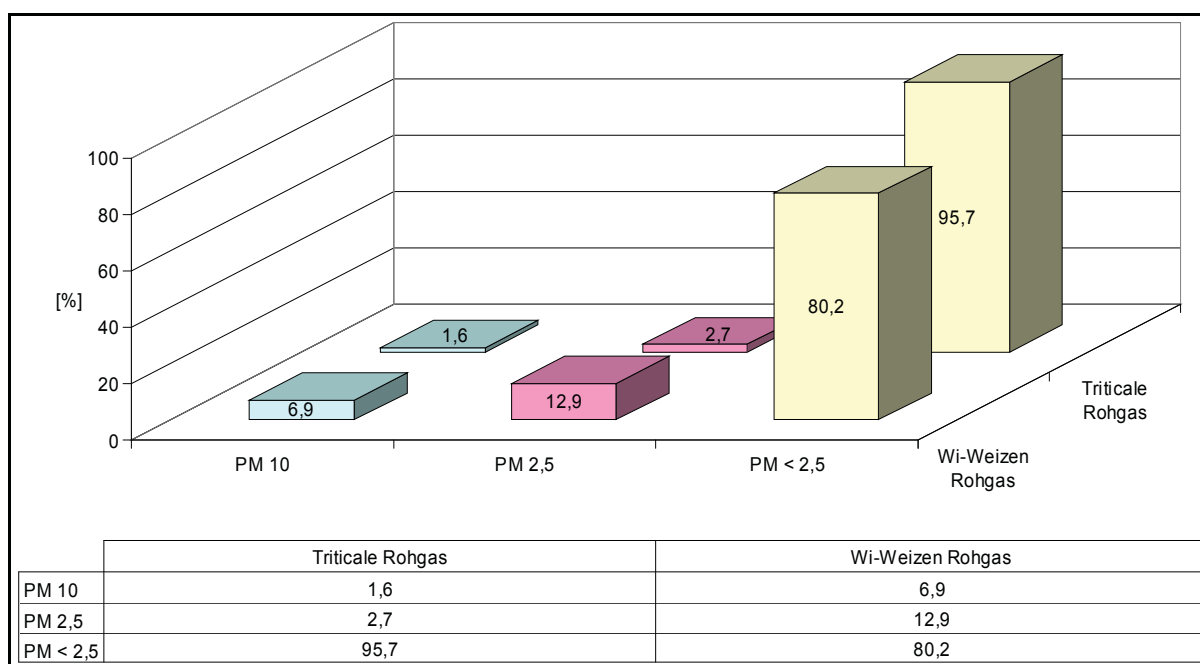


Abbildung 59: Vergleich der Ergebnisse der Rohgas-Feinstaubmessungen für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh als Hacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; angegeben in %; Korngrößenverteilung hier dargestellt als PM 10 (Partikel > 10 µm); PM 2,5 (Partikel 2,5 < x ≤ 10 µm); PM < 2,5 (Partikel ≤ 2,5 µm)

Die Bestimmung der Feinstaubanteile erfolgte mit einem Kaskadenimpaktor vom Typ „Jonas II“ des Herstellers Fa. Paul Gothe gemäß VDI 2066 Bl. 10 im Roh- und Reingas [/1/].

Weiterhin wurden an der Anlage PCDD/F sowie PAK-Emissionsmessungen durchgeführt. Es wurden Analysen für die Rohgasseite (Analysen aus Filterproben der Gesamtstaubmessungen) (s. Tab. 23) und die Reingasseite nach der Entstaubung durchgeführt (s. Tab. 24 und Abb. 60).

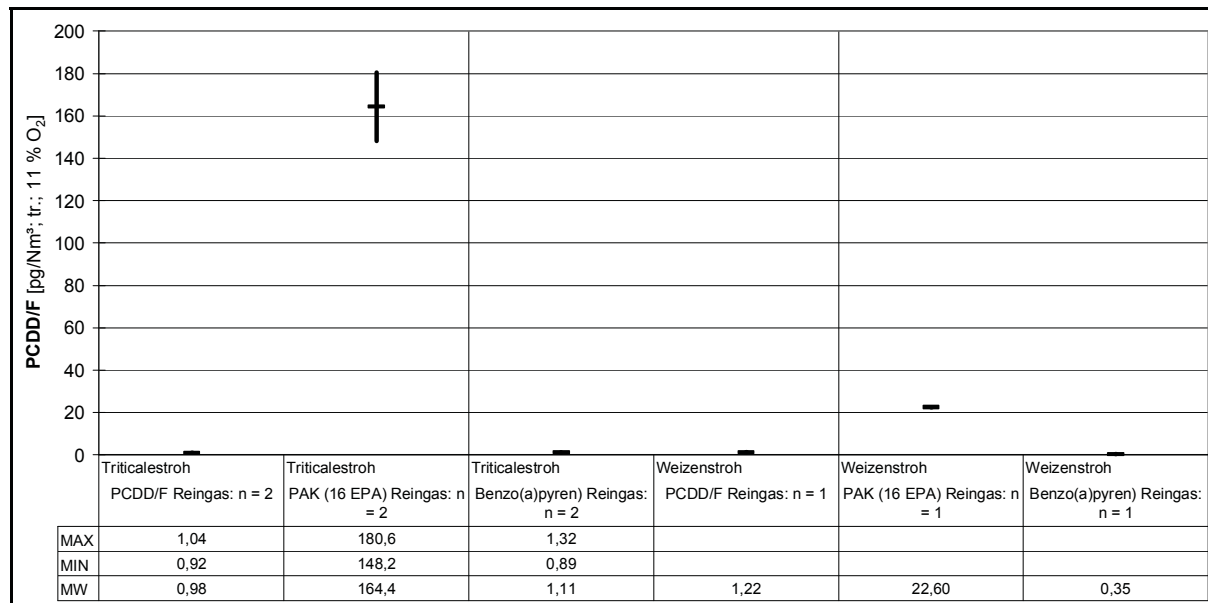
Tabelle 23: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas) für die Brennstoffe Triticalestroh (Messung 1 und 2) und Winterweizenstroh (Messung 3) in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % Vol. O ₂)	Dimension	Messung 1/2	Messung 3	Messung 4
Summe PCDD/F	ng I-TE/Nm ³	0,031	0,029	0,031
PAK (16 nach EPA)	µg / Nm ³	20,2	34,3	20,2
Benzo(a)pyren	µg / Nm ³	-	1,1	0,49

Tabelle 24: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas) für die Brennstoffe Triticalestroh (Messung 1 und 2) und Winterweizenstroh (Messung 3) in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Konzentration (11 % Vol. O ₂)	Dimension	Messung 1	Messung 2	Messung 3
Summe PCDD/F	pg I-TE/Nm ³	< 1,04	< 0,92	1,22
PAK (16 nach EPA)	µg / Nm ³	180,6	148,2	22,6
Benzo(a)pyren	µg / Nm ³	0,89	1,32	0,35

Alle ermittelten Konzentrationen liegen deutlich unterhalb des TA Luft Grenzwertes für PCDD/F von 0,1 ng I-TE/Nm³ bei 11 % Vol. O₂. Die Messwerte der Staubproben aus dem Rohgas liegen ca. um Faktor 30 höher als im Reingas. Eine Anlagerung der Dioxinverbindungen an Partikel kann damit bestätigt werden.



Abbildungung 60: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas) für die Brennstoffe Triticalestroh (n = 2) und Winterweizenstroh (n = 1) in Form von Strohhäcksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Auf Grund der für die Brennstoffe stark unterschiedlichen Verbrennungsgüte (eingesetzte Brennstoffe) wurden in den Messungen 1 und 2 deutlich höhere Emissionskonzentrationen von PAK im Reingas nachgewiesen (Triticale). Dagegen ist für PCDD/F kein Unterschied erkennbar.

Bei beiden Anlagen ist eine Verbrennung von Stroh in Ballenform möglich. Vorteile des Linka-Kessels liegen in der automatischen Zuführung, wobei das Stroh gehäckselt und anschließend pneumatisch bis in den Stoker transportiert wird. Emissionsseitig wies diese Anlage im Hinblick auf die Ausbrandqualität während der Messung gravierende Mängel auf. Die sichere Einhaltung des in der TA Luft festgelegten Emissionswertes für CO ist nicht gegeben. Der Staubgrenzwert kann trotz z.T. sehr hoher rohgasseitiger Beladung mit der installierten Abscheidetechnik (Gewebefilter Firma Deichmann) sicher eingehalten werden.

3.1.4 Schlussfolgerungen für die untersuchten Strohfeuerungsanlagen

- Die Emissionswerte unterscheiden sich stark in Abhängigkeit vom Brennstoff und von der eingesetzten Feuerungstechnologie.
- Gleiches Ausgangsmaterial z.B. Referenzbrennstoff – Winterweizenstroh – kann nach Aufbereitung des Brennstoffs als Häcksel bzw. Pellets zu völlig gegensätzlichen Emissionswerten führen.
- Die Grenzwerte konnten im Rahmen der entsprechend anzuwendenden 1. BImSchV bzw. TA Luft zuverlässig nur von der Häckselfeuerung Reka HKRST 60 eingehalten werden. Alle anderen überprüften Feuerungsanlagen wiesen Überschreitungen in Bezug auf eine oder mehrere Emissionskomponenten – CO oder Staub – auf.
- Die Ergebnisse der PCDD/F-, PAK- und Benzo(a)pyren-Messungen zeigen eine generelle Einhaltung evtl. heranzuziehender TA Luft Grenzwerte. Die niedrigsten Emissionswerte wurden dabei bei der Feuerungsanlage mit der größten Feuerungsleistung (400 kW) ermittelt. Einzelne Überschreitungen sind die Folge sehr schlechter Ausbrandergebnisse.
- Als funktionell abgestimmt und emissionsarm kann nur die Häckselfeuerung Reka HKRST 60 bezeichnet werden. Für die Linka-Anlage mit 400 kW Leistung ist vor allem eine verbesserte Kesselregelung und für die Reka-Anlage HKRST 30 sowie den Ganzballenvergaser HSV 145 eine Entstaubung erforderlich.
- Messungen zur Korngrößenverteilung an den bestehenden Anlagen haben gezeigt, dass die Stäube sehr fein sind und 90 % der Massenanteile einem Partikelgrößenbereich unter 2,5 µm zuzuordnen sind. Durch Messungen mit einem Niederdruck-Kaskadenimpaktor konnte gezeigt werden, dass die mittlere Korngröße bei 0,1 µm liegt.

3.1.5 Ergebnisse neuartiger Anlagen

Um einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn generell, aber auch für das laufende FNR-Projekt zu bekommen, hat sich der Freistaat Thüringen mit der TLL zusammen bemüht, eine neue innovative, speziell für halmgutartige Brennstoffe besonders geeignete Feuerungsanlage am Standort des Thüringer Zentrums für nachwachsende Rohstoffe in Dornburg zu etablieren. Am 20.12.2006 konnte diese Anlage in Betrieb genommen werden. Bei der hier etablierten Feuerungstechnologie handelt es sich um eine wassergekühlte Vorschubrostfeuerung der Firma Schmid (Schweiz), Typ UTSW mit einer Nennwärmeleistung von 360 kW. Sie ist im besonderen Maße geeignet, Brennstoffe mit hohen Aschegehalten bzw. niedrigen Ascheschmelzpunkten optimal zu verbrennen. Um die bei der Verbrennung entstehenden Staubemissionen zu minimieren, verfügt der Kessel über einen integrierten Multizyklon sowie einen neuartigen Patronen-Metallvliesfilter mit einem 4 Kammersystem, Typ PJ-1250 (Firma Winkel). Die Möglichkeit der gezielten gestuften Primär- und Sekundärluftzugabe und eine vorhandene Rauchgasrezirkulation sollen niedrige Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen garantieren. Als weitere Neuerung ist an der Anlage eine Brennstoffmisch- und -wägeeinheit etabliert, welche 1kg genaue Rezepturen für die Untersuchung gemischter Brennstoffe ermöglicht. Erste Vorversuche (s. Abb. 61) zeigen die generelle Tauglichkeit der Anlage sowie die Einhaltung der TA Luft Grenzwerte der kontinuierlich zu ermittelnden Emissionsparameter.

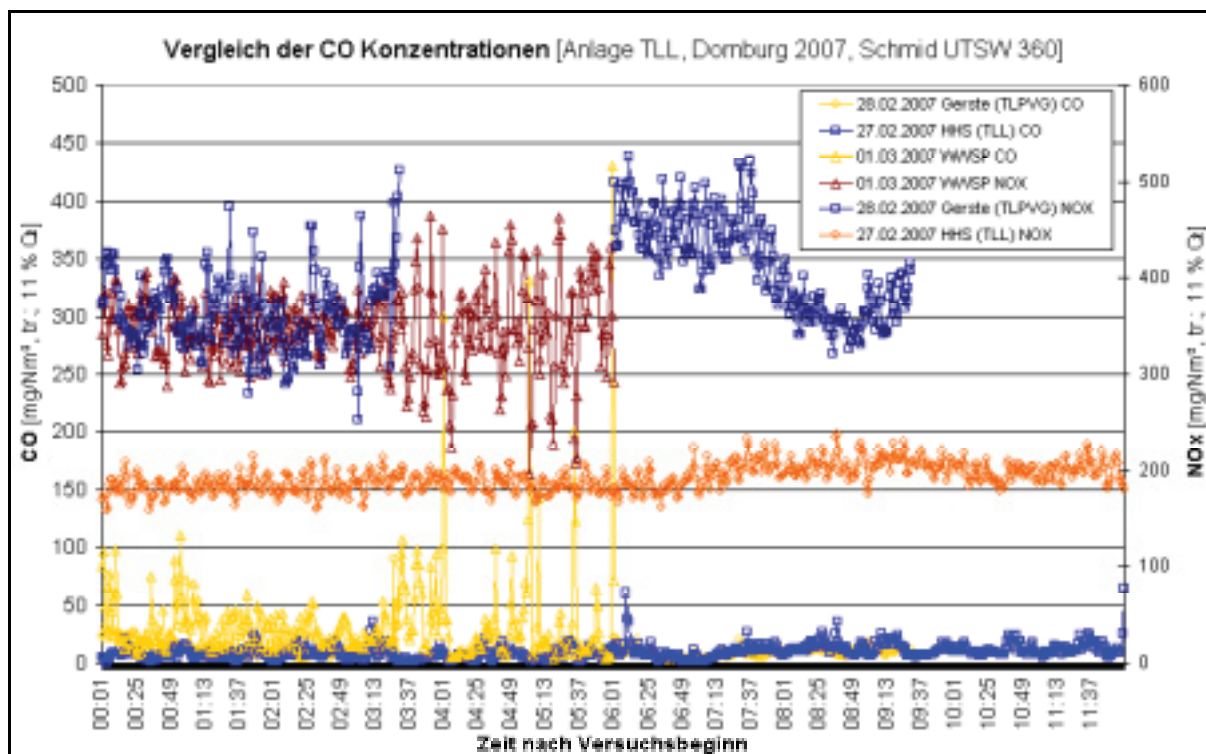


Abbildung 61: Ergebnisse der CO-, NOx-Messungen (Rohgas) für die Brennstoffe Gerstenkörner (Gerste), Holzhackschnitzel (HHS) und Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Firma Schmid – 2007; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Ergänzungen dieser Messungen durch die Ermittlung der entstehenden Roh- und Reingasstaubgehalte, die Minderungsmöglichkeiten durch die etablierten Filtersysteme und deren ökonomische Bewertung sowie die Eruiierung der HCl- und PCDD/F-Emissionen erfolgen unter Vorbehalt der Einwerbung weiterer Drittmittel.

Des weiteren erfolgte eine Vorprüfung einer weiteren neuartigen Kesseltechnologie (Typ GE 30 – 30 kW) der Firma Innovative Heiztechnik (IHT). Im Rahmen der Messung der kontinuierlichen Emissionsparameter wurden hier auch ergänzende Versuche mit den Referenzbrennstoffen vorgenommen. Durch Modifizierung des Luftrings zur Zuführung der Primärluft konnten dabei weitere Optimierungen des Ausbrandergebnisses erreicht werden. Nachweisbar war für die untersuchten Brennstoffe die Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV für die Parameter CO, Staub und NOx (s. Abb. 62 bis 64). Dabei wurden auch bei dieser Technologie die brennstoffbedingten Abhängigkeiten der Emissionsparameter Staub und NOx deutlich.

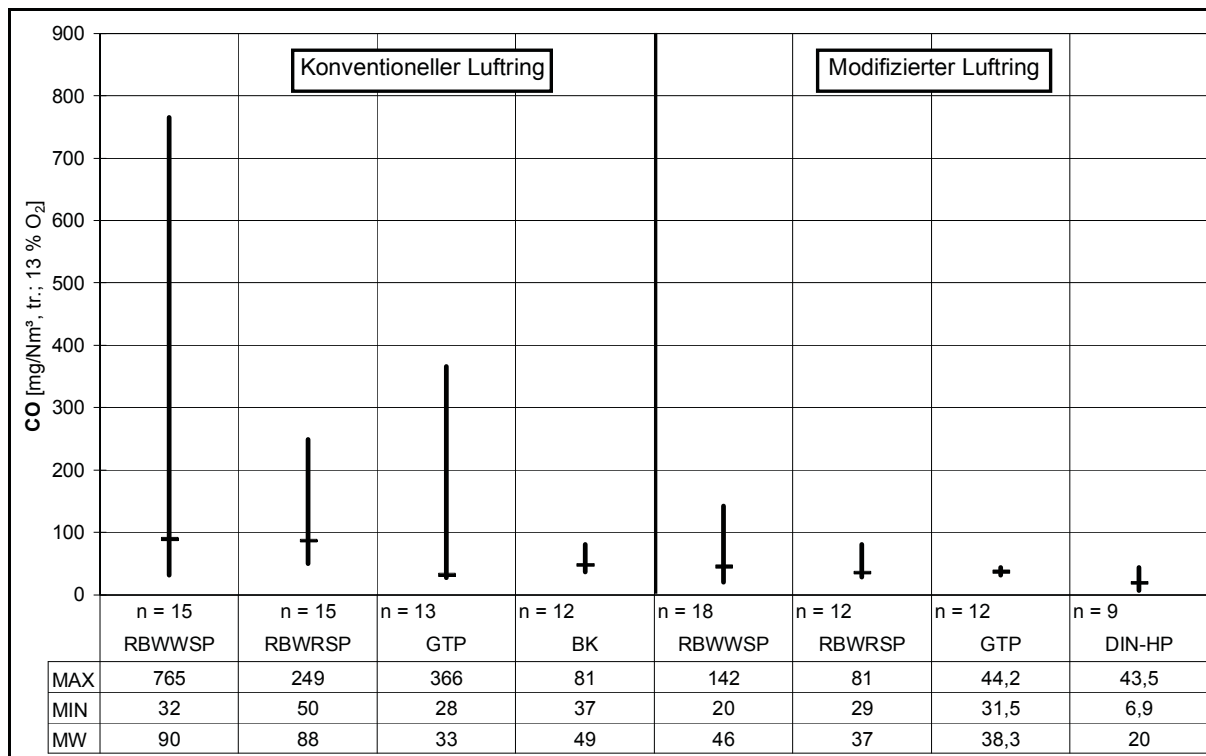


Abbildung 62: Vergleich der CO-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), Winterroggenstrohpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

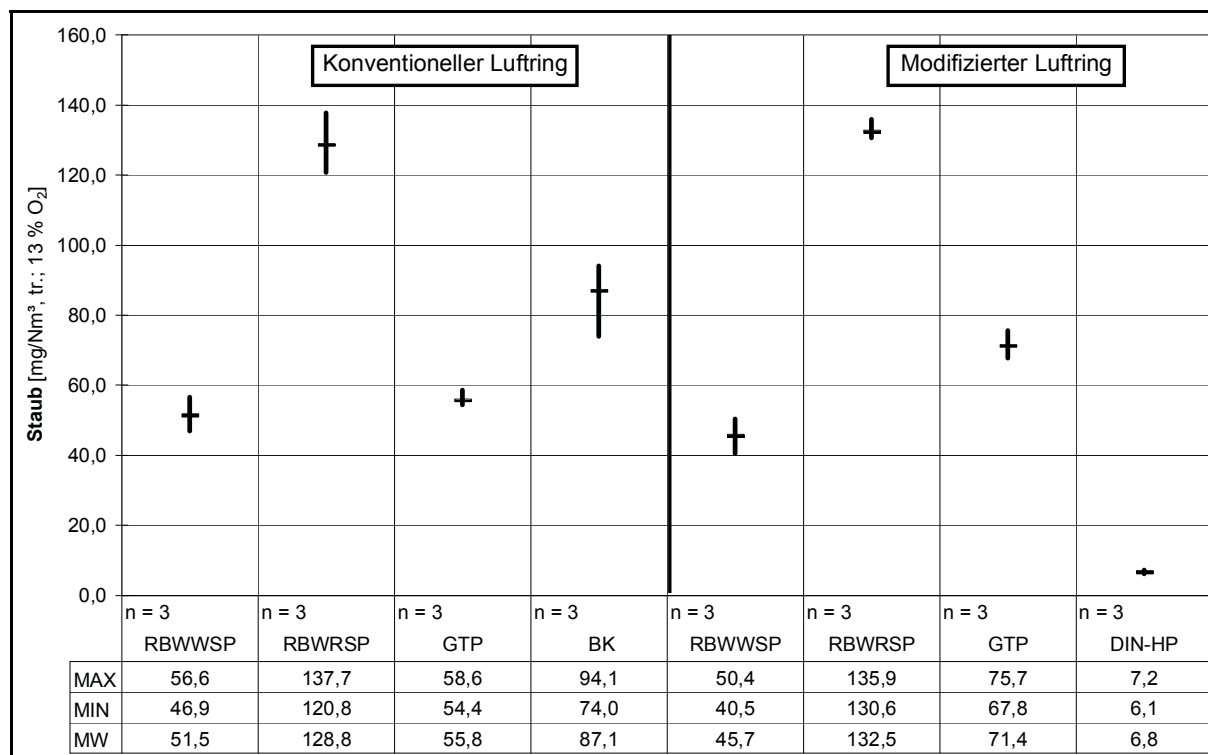


Abbildung 63: Vergleich der Staub-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), Winterroggenstrohpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

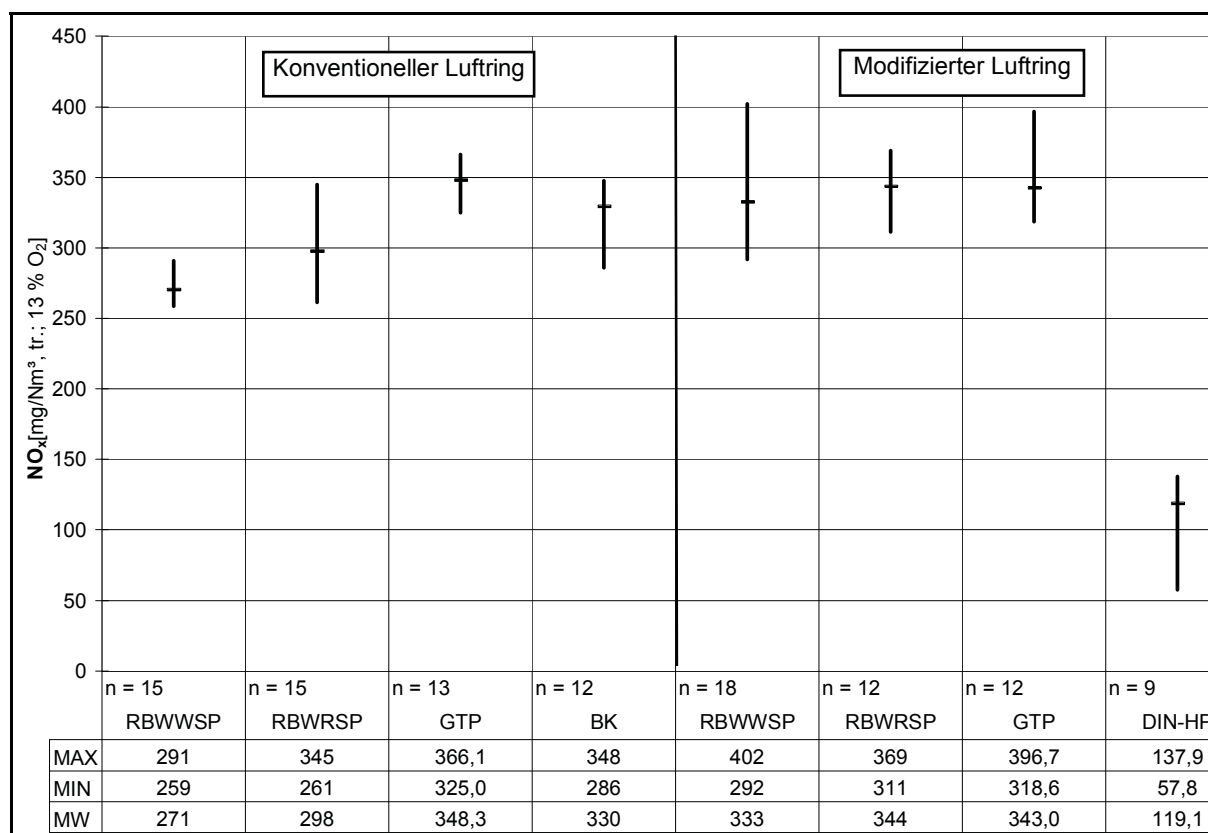


Abbildung 64: Vergleich der NOx-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), Winterroggenstrohpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

3.2 Messergebnisse der kontinuierlichen Emissionsparameter

3.2.1 Kohlenmonoxidemissionen (CO)

Generell kann festgestellt werden, dass die Anlagentechniken in den letzten Jahren, wahrscheinlich aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach halmguttauglichen Feuerungsanlagen, besonders im landwirtschaftlichen Bereich, in ihrer Qualität in Bezug auf ihre Funktionalität sowie hinsichtlich ihrer Effizienz bzw. der Qualität des Ausbrandes deutlich verbessert wurden. Während in den zurückliegenden Untersuchungen [/2/, /23/, /28/ bis /32/] immer wieder Überschreitungen der Anforderungen der 1. BImSchV hinsichtlich des CO-Grenzwertes (4 g/Nm^3 , 13 % Vol. O_2) festgestellt wurden, ist das bei den heute am Markt angebotenen Anlagen auf bestimmte Technologien bzw. den Einsatz von für bestimmte Technologien nicht geeigneten Brennstoffen oder eine unsachgemäße Einstellung der Anlagen zurückzuführen. Dabei sind neben den notwendigen und regelmäßig durchzuführenden Wartungs- bzw. Reinigungsarbeiten, dem ordnungsgemäßen Brennstoffeinsatz und den Einstellungen der Anlage, der richtigen Dimensionierung der Anlage und sowohl die hydraulische als auch die abgasseitige Einbindung die entscheidenden Kriterien für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung von anspruchsvollen Brennstoffen. Für einen störungsfreien Betrieb der Anlage werden dabei von den Feuerungsanlagenherstellern unterschiedliche Strategien verfolgt. Das sind zum einen besonders gestaltete Feuerraumsysteme bzw. Brenner (z.B. Einsatz beweglicher Rost- oder Bewegungselemente oder gestufte Verbrennung bzw. Vergasung) und zum anderen die Forderung nach dem Zusatz von Additiven zum Brennstoff (z.B. Kalk).

Die hauptsächlich in der Praxis untersuchten Anlagen zeigen neben brennstoffbedingten Variationen, z.T. extreme anlagen- als auch leistungsspezifische Unterschiede bei den erreichbaren Niveaus an Kohlenmonoxidemissionen (s. Abb. 65 bis 74). Dabei wird deutlich, dass die Brennstoffauswahl sowie die Auswahl einer geeigneten Feuerungstechnologie den Grundstein für eine funktionierende, als auch genehmigungskonforme Wärmeerzeugung bilden.

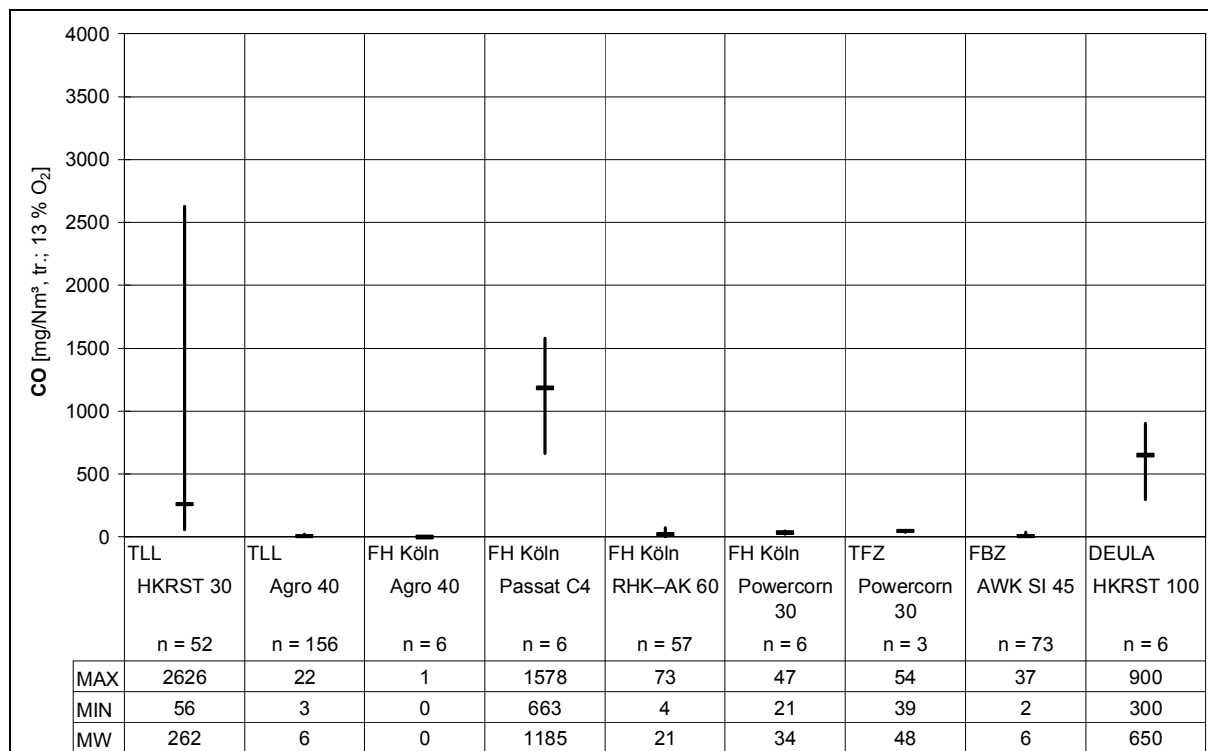


Abbildung 65: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

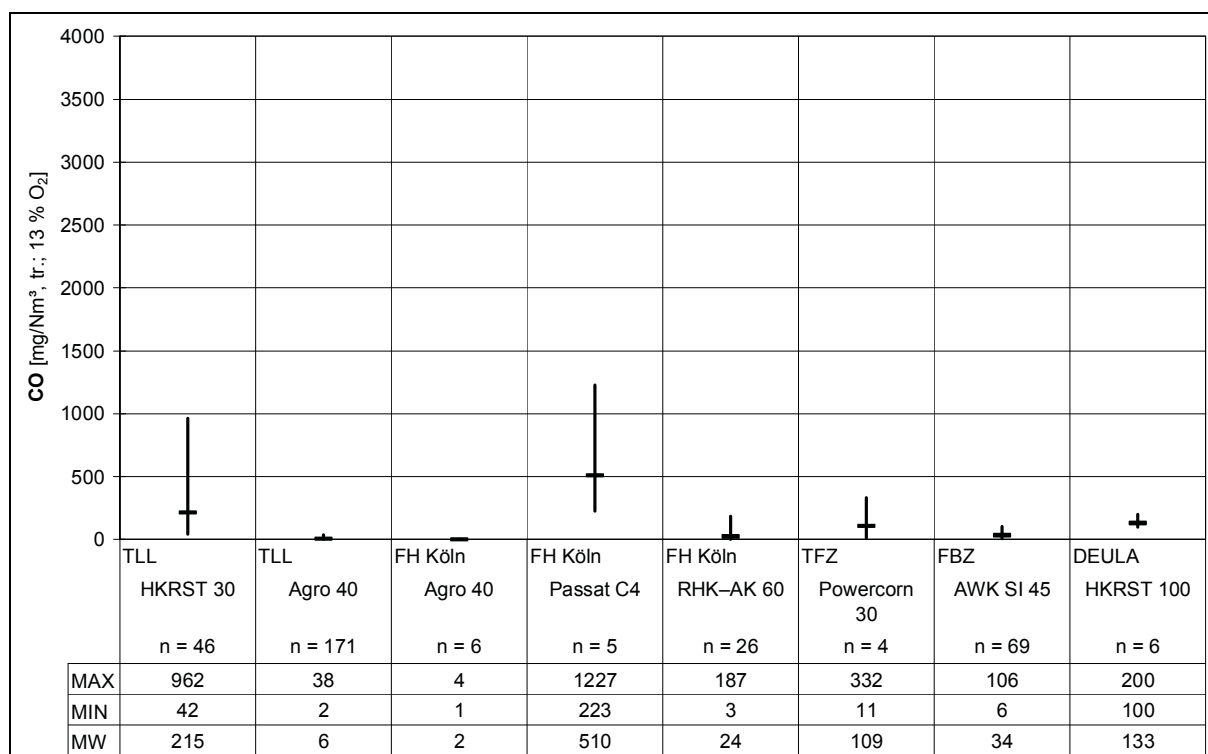


Abbildung 66: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

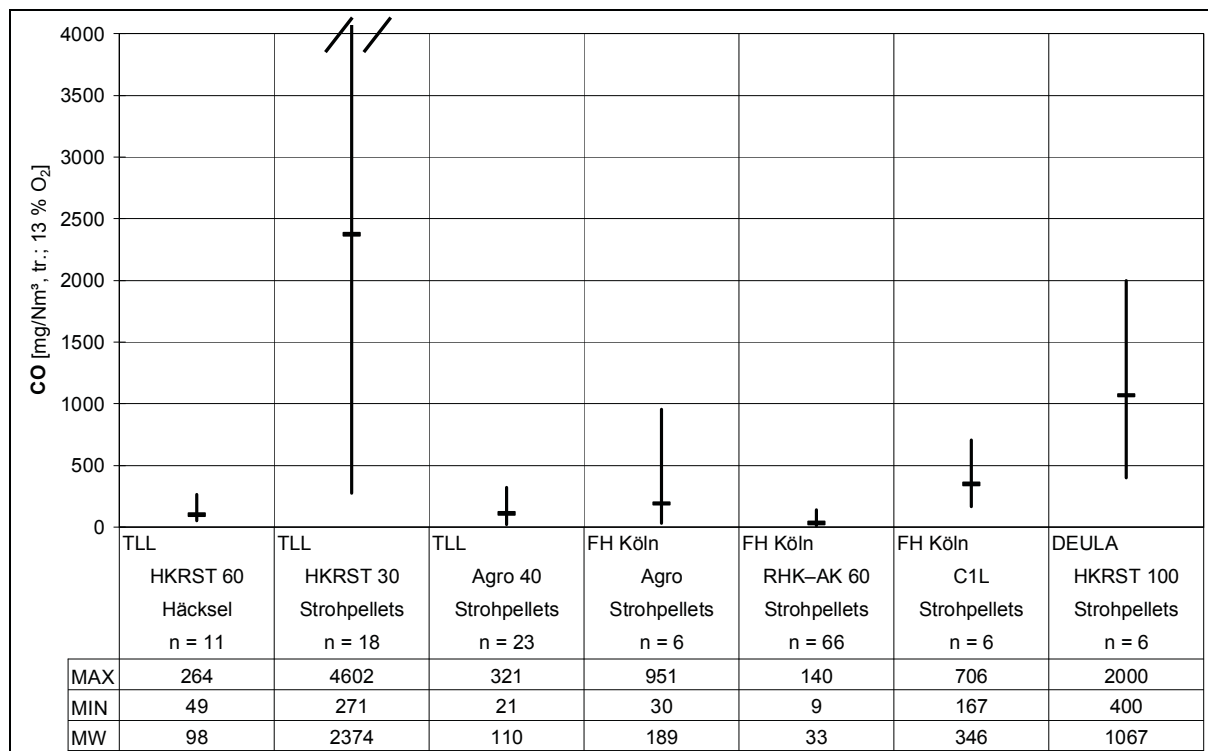


Abbildung 67: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

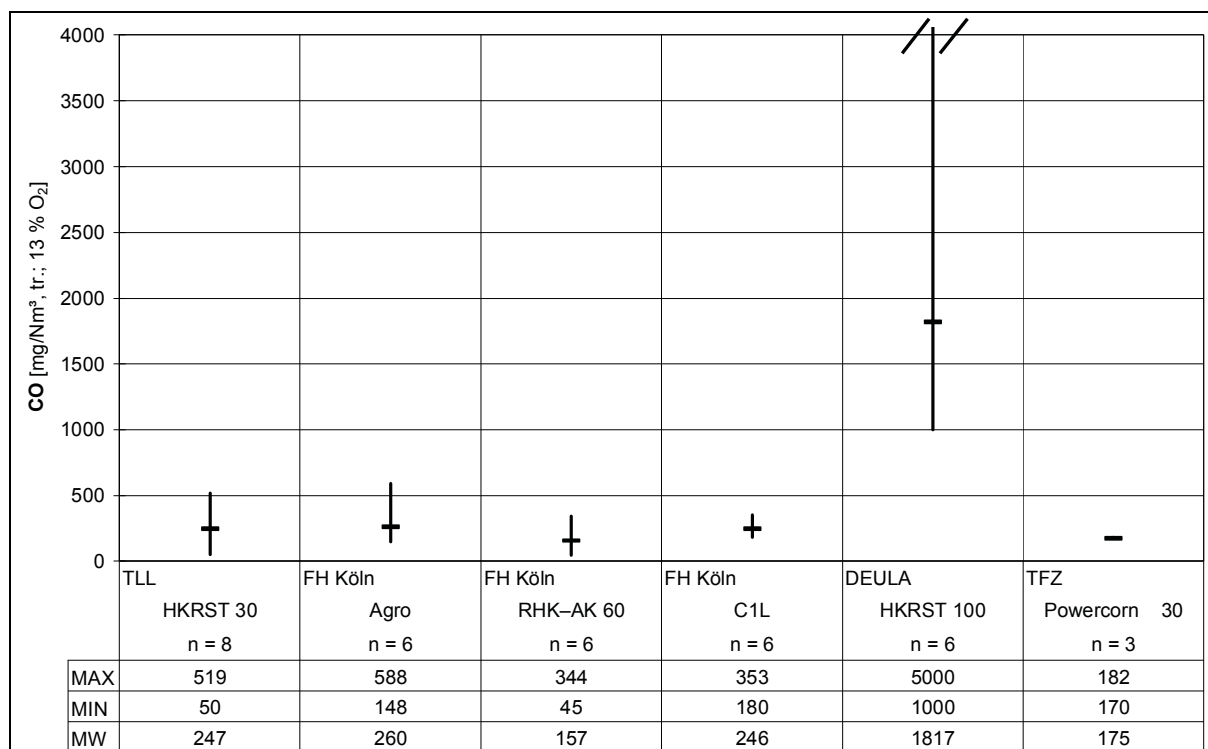


Abbildung 68: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die Abbildungen 65 bis 68 verdeutlichen eindrucksvoll die Entwicklungen von modernen und hocheffizienten Feuerungsanlagen, welche auch sehr viel höheren Anforderungen hinsichtlich der Ausbrandqualität gerecht werden. So konnten z.B. im Rahmen der Messungen der TLL/TLUG am Agro 40 für die eingesetzten Referenzbrennstoffe Wintergerstenkörner (WG RB) bzw. Winterweizenkörner (WW RB) Mittelwerte, aus 156 für WG RB bzw. 171 für WW RB Viertelstundenmittelwerten, gemessen werden, welche bei einem **667-stel** bzw. **0,15 %** des zulässigen Grenzwertes für Stroh als Brennstoff liegen (s. Abb. 65 und 66). Messungen anderer Institutionen an denselben Technologien bzw. weiteren Anlagentechnologien bestätigen diese Ergebnisse [/3/, /18/, /20/, /42/]. Es wird aber auch deutlich, dass generelle und zum Teil recht große Unterschiede in den erreichbaren CO-Niveaus sowohl zwischen den einzelnen Feuerungssystemen und Leistungsklassen als auch zwischen den eingesetzten Brennstoffen bzw. ihrer Aufbereitungsform bestehen. Als konventionell einzustufende Feuerungsanlagen² zeigen deutliche Einschränkungen hinsichtlich höherer Anforderungen an die Verbrennungsqualität, während neuartige und z.T. auch speziell für Getreide entwickelte Technologien bei auf CO-Minimierung eingestellte Anlagenparameter bereits Emissionsniveaus aufweisen, welche dem Stand der Technik der besten am Markt verfügbaren Techniken (BVT) im Bereich Holzverbrennung entsprechen. Die in den Versuchen ermittelten CO-Konzentrationen beim Einsatz von Stroh in Form von Häckseln oder Pellets waren ebenso verbessert wie die der Getreidesortimente jedoch hinsichtlich der erreichbaren Minimierungsmöglichkeiten begrenzt (s. Abb. 67 und 68). **Hier wurde im Durchschnitt der geeigneten Anlagen „nur“ eine Reduzierung der CO-Emissionen auf etwa 1/20-stel des bisherigen Grenzwertes erreicht.**

Betrachtet man eine Auswahl der geeignetsten Technologien hinsichtlich des Ausbrandergebnisses und der eingesetzten Referenzbrennstoffe so wird deutlich, dass mittlerweile ein Stand der Technik erreicht wird, der zumindest in Bezug auf die Ausbrandqualität mindestens genauso gut ist wie bei Holzfeuerungsanlagen (s. Abb. 69). Es werden aber auch hier Abstufungen in der qualitativen Eignung der Brennstoffe sowie der Anlagentechnologien deutlich.

² Anlagen, welche nicht spezifisch für den Einsatz von Halmgütern unter Berücksichtigung der Anforderungen der 1. BImSchV bzw. TA Luft entwickelt worden sind

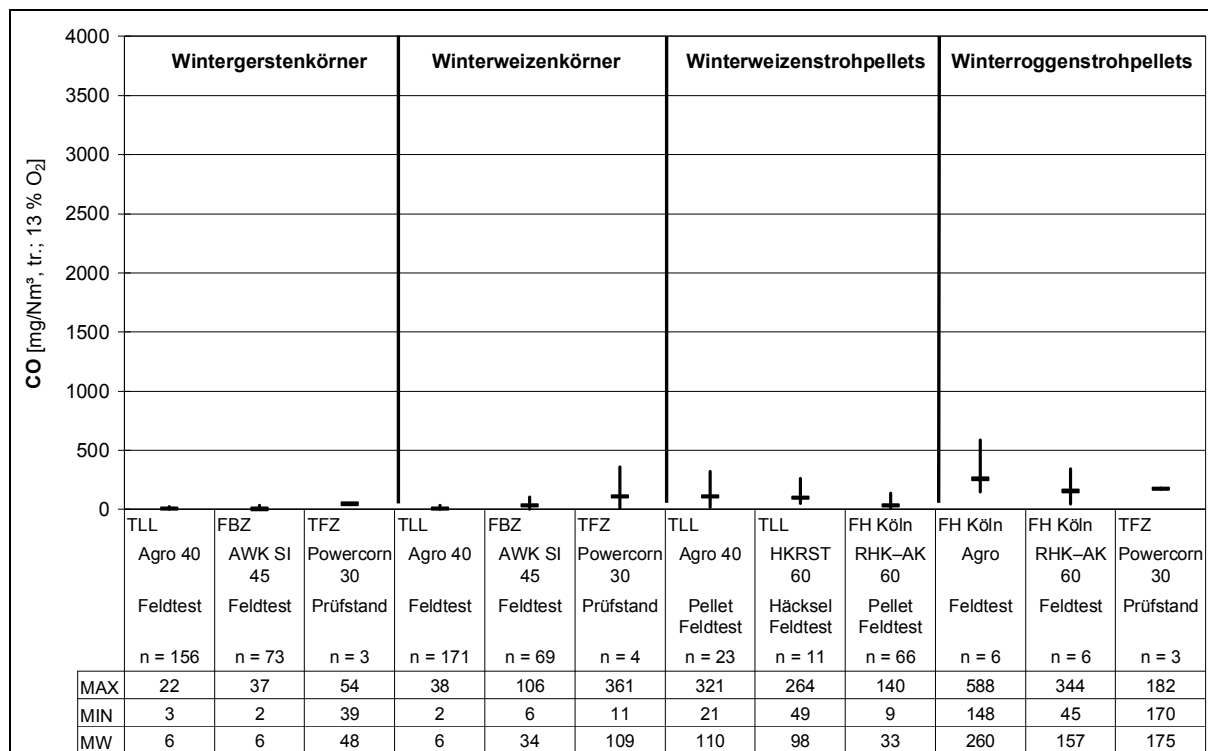


Abbildung 69: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Auch das Teillastverhalten wurde an mehreren Anlagen untersucht. Exemplarisch sind in Abbildung 70 die Ergebnisse der Versuche mit den Referenzbrennstoffen WG RB (hier bezeichnet als WG II) und WW RB des FBZ [11/] dargestellt. Es wird deutlich, dass bei individueller Einstellung der Betriebsbedingungen auf den jeweiligen Brennstoff optimale Abbrandbedingungen erreicht werden können. Die Ergebnisse beim Betrieb in Teillast fallen dabei bei beiden Brennstoffen in Bezug auf die CO-Emissionen etwas schlechter aus als bei Vollast. Sie würden aber selbst den im Entwurf der novellierten 1. BImSchV vom 24.03.2009 hinsichtlich der Grenzwerte bei Praxisanlagen und den darin formulierten Anforderungen für beide Stufen gerecht (Stufe 1: 1 g/Nm³ bzw. Stufe 2: 0,4 g/Nm³). Hinsichtlich der anderen Emissionsparameter NO_x bzw. SO₂ fallen die Unterschiede deutlich geringer aus.

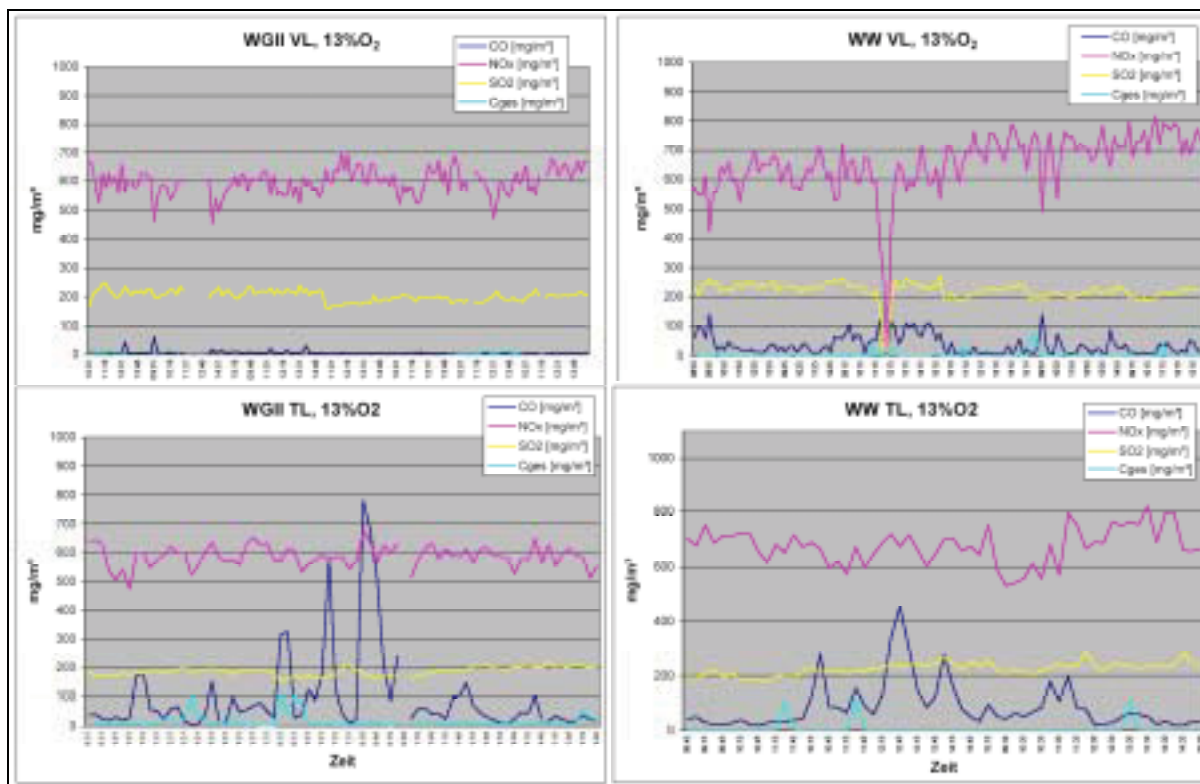


Abbildung 70: Vergleich der Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz ausgewählter Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoffe: Wintergerste WG RB (WGII) und Winterweizen WW, Kessel: AWK 45 SI [/11/]

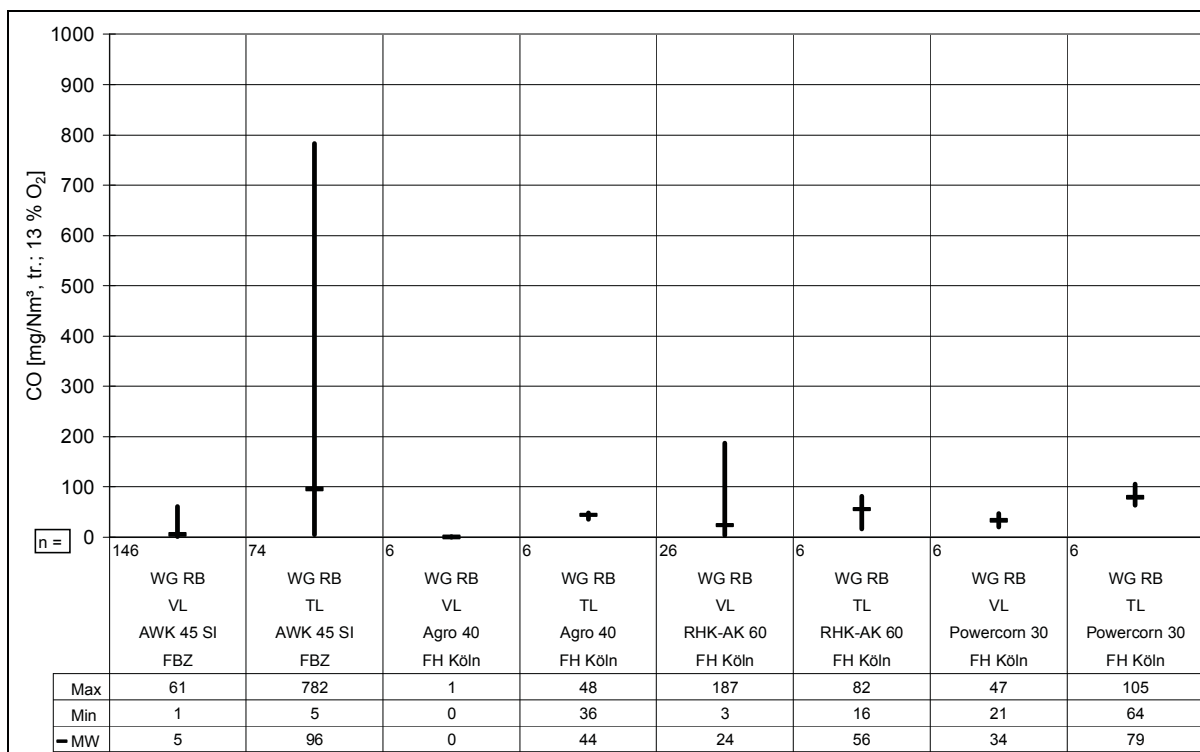


Abbildung 71: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerste (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

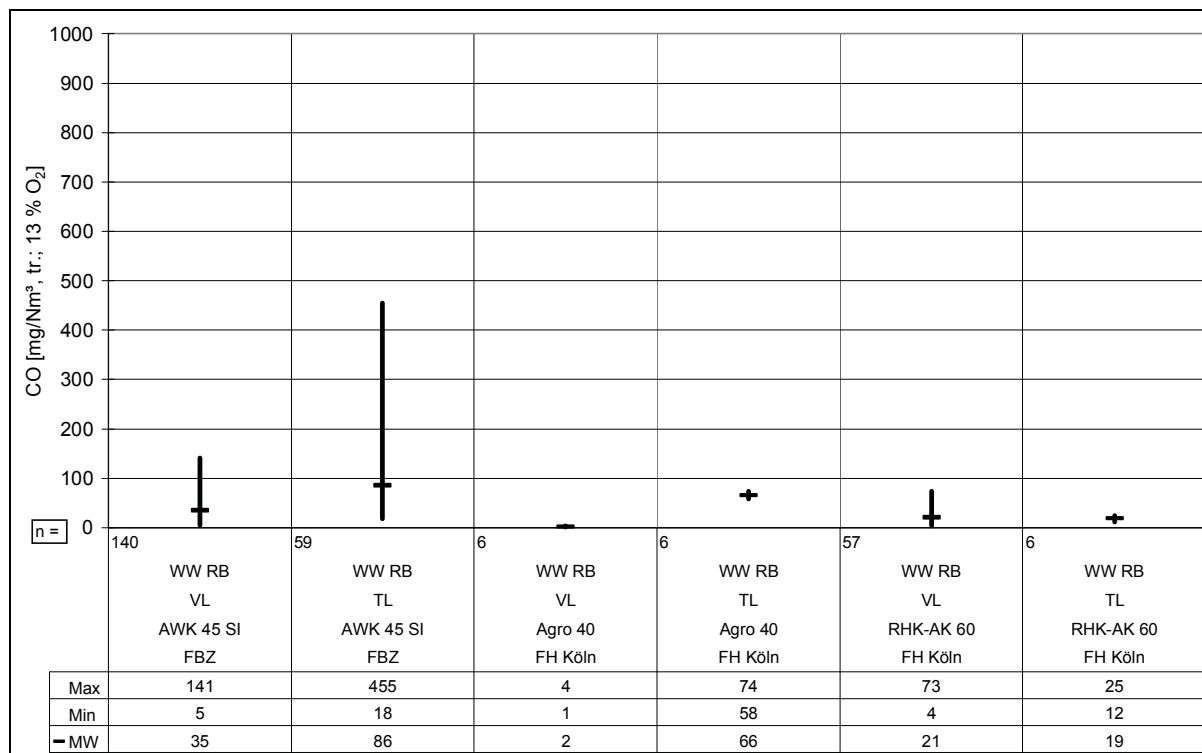


Abbildung 72: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizen (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

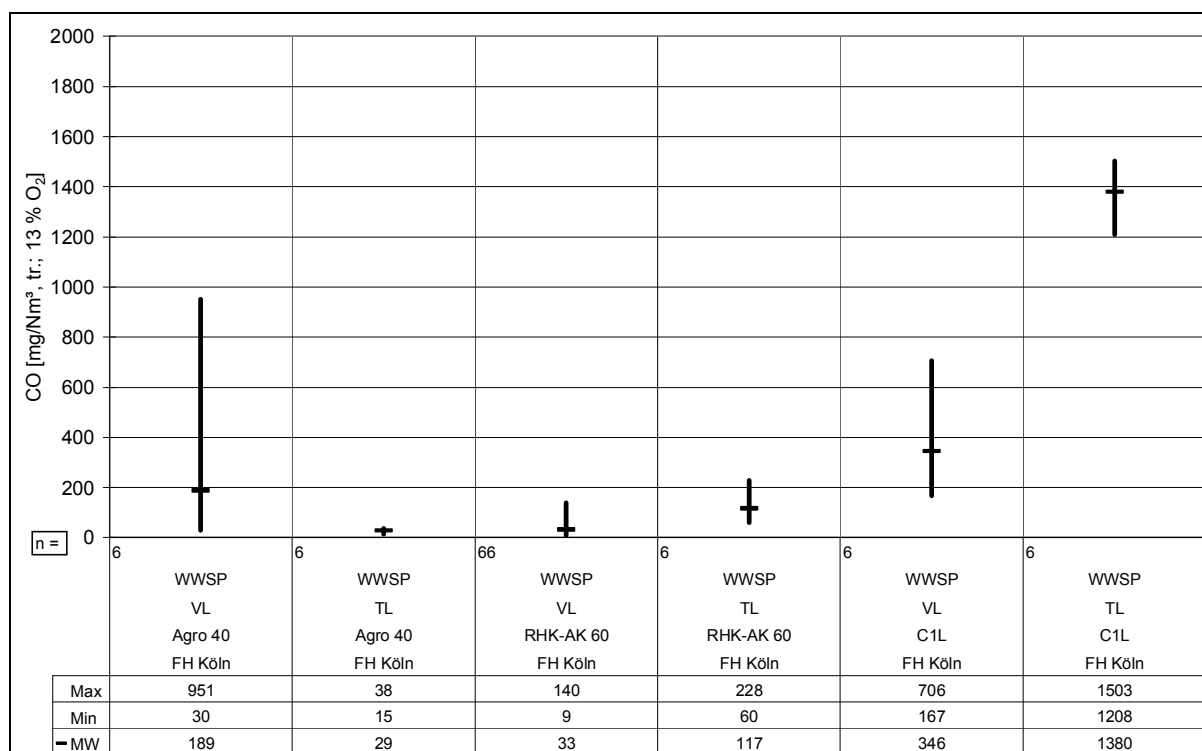
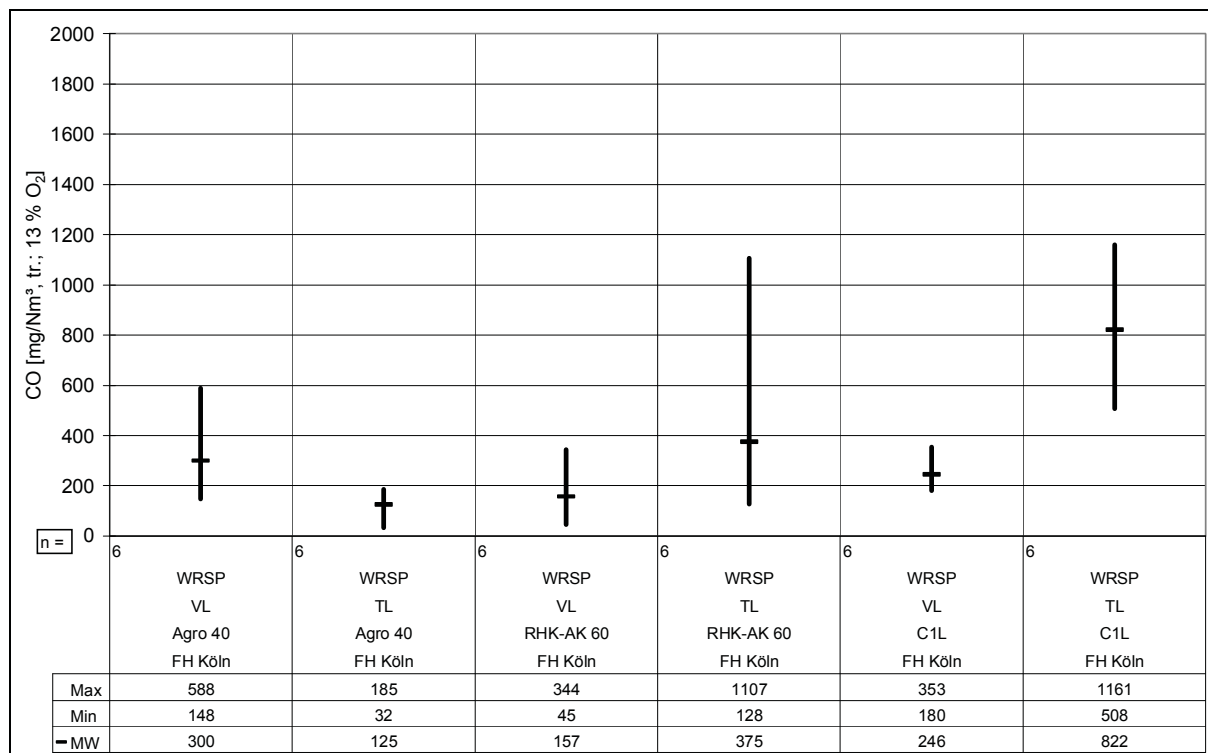


Abbildung 73: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]



Abbildungung 74: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

Die in den Abbildungen 70 bis 74 zusammengestellten Vergleiche der Entwicklung der CO-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Lastzustand bzw. der eingesetzten Brennstoffe und Anlagentechnologien zeigen im Wesentlichen die etwas geringere Ausbrandqualität beim Teillastbetrieb. Auffällig ist, dass die CO-Niveaus der untersuchten Strohpellets sowie der eher als konventionell einzustufenden Feuerungsanlagen, besonders im Teillastbetrieb erheblich höher lagen als beim Einsatz von Getreidekörnern bzw. in neuartigen Feuerungsanlagen.

Hinsichtlich der Einschätzung wechselnder Lastzustände sind natürlich auch Anfahrprozesse relevant. Während der Felduntersuchungen wurde dabei das gesamte Spektrum vom Fehlschlagen des Zündvorganges bis hin zum schnellen und sicheren Zünden festgestellt. Abbildung 75 zeigt einen emissionsseitig dokumentierten Anfahrvorgang und die Emissionsverläufe verschiedener Rauchgasparameter. Dieser verdeutlicht die Notwendigkeit einer richtigen Dimensionierung der Anlagen und somit die Verringerung der Anzahl der Zündvorgänge. Sind die optimalen Betriebsbedingungen einmal erreicht, ist, wie Abbildung 76 eindrucksvoll verdeutlicht, ein stabiler und emissionsarmer automatischer Betrieb möglich.

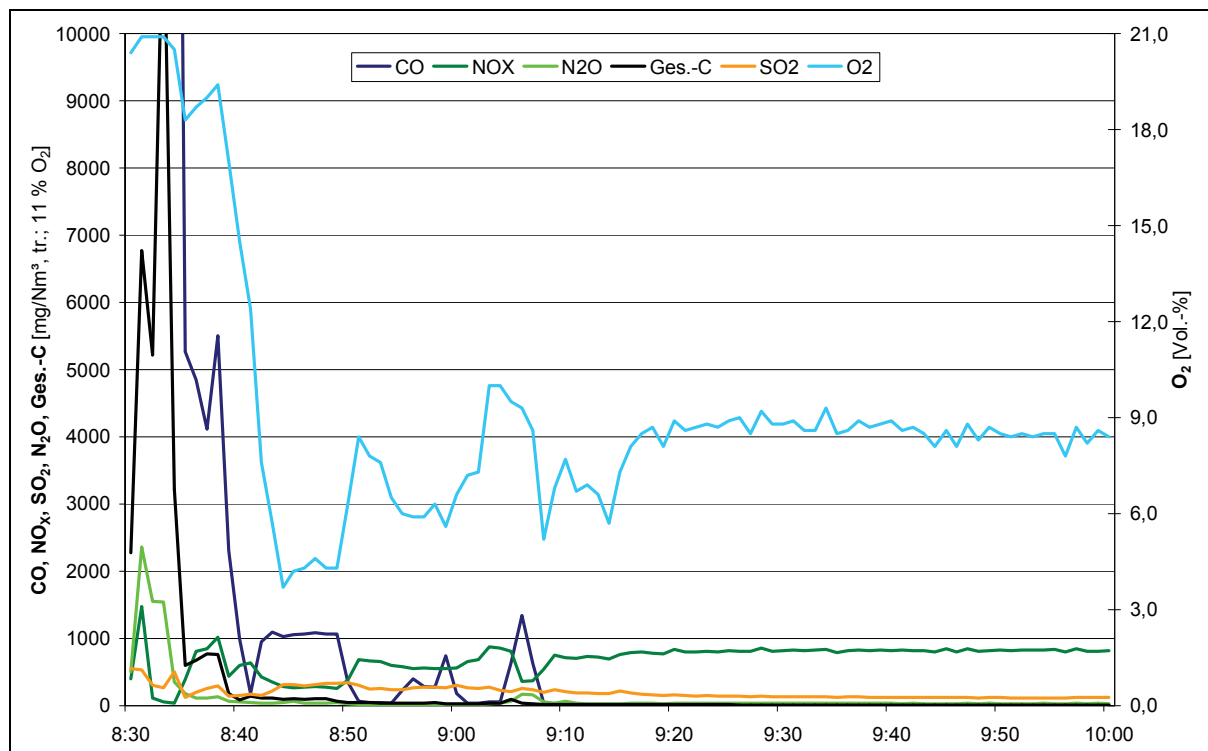


Abbildung 75: Anfahrvorgang für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Buttelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

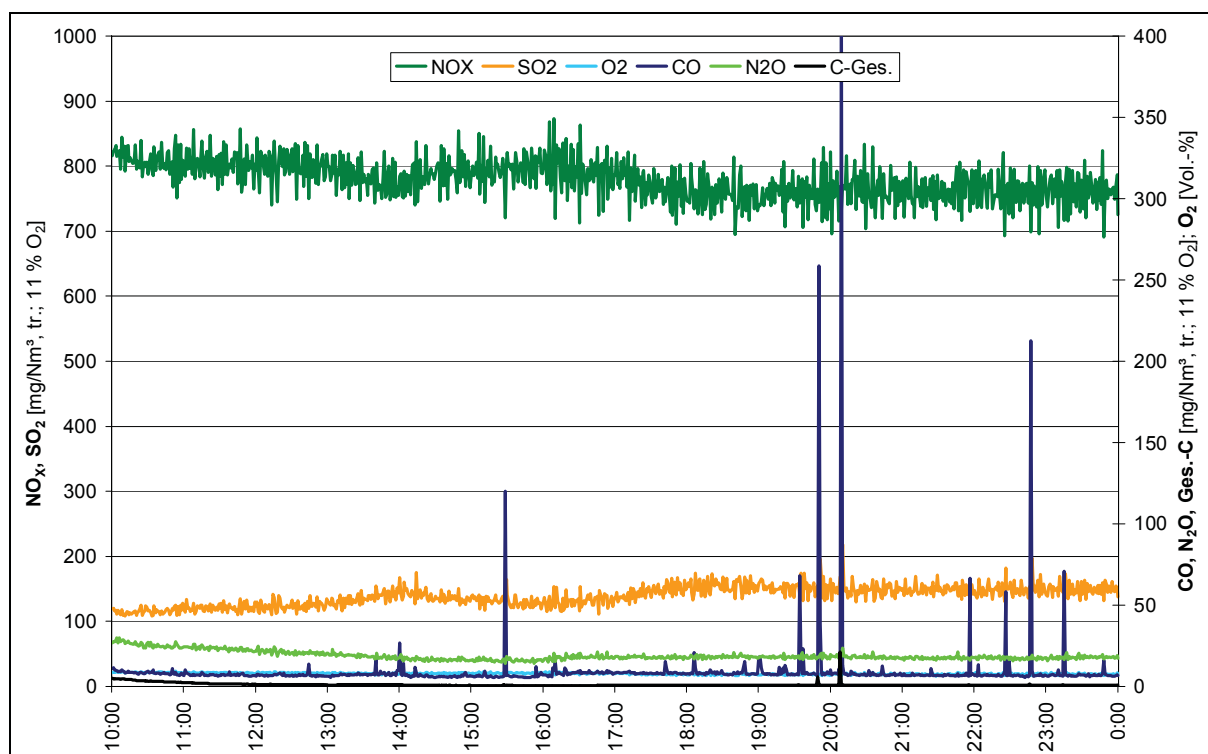


Abbildung 76: Typischer Verbrennungsverlauf für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Buttelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

3.2.2 Gesamtstaubemissionen

Der zweite im Geltungsbereich der 1. BImSchV relevante Parameter ist der Gehalt an Staub im Abgas. Während die Grenzwerte der Europäischen Union, gemäß EN 303-5 (1999) für Staub bei 200 mg/Nm³ liegen [43/], fordert die deutsche Verordnung die Einhaltung eines Staubgrenzwertes von 0,15 g/m³, bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 % unter Normbedingungen. Bei den Versuchen sollten mindestens drei Wiederholungsmessungen pro Brennstoff nach den Anforderungen der 1. BImSchV bzw. mit dem Messverfahren nach TA Luft (VDI 2066, Blatt 2 bzw. 7)¹ durchgeführt werden.

Während die meisten Anbieter von Anlagentechniken die gegenwärtigen Anforderungen bzw. die höheren Anforderungen der Länder bzw. der Novelle der 1. BImSchV in Bezug auf die CO-Emissionen erfüllen können (CO-Grenzwert 4 g/Nm³ bzw. 1 g/Nm³) wird hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte für die Staubemissionen deutlich, dass nur einzelne Anlagentechnologien unabhängig vom Brennstoff die Grenzwerte der 1. BImSchV sicher unterschreiten (s. Abb. 77 bis 85). Dies gilt um so mehr bei höheren Anforderungen hinsichtlich des Staubgrenzwertes. Für die Mehrzahl der untersuchten Feuerungsanlagen wird deutlich, dass der Einsatz ausgewählter Brennstoffe bzw. der Einsatz von weiteren Maßnahmen notwendig wird, um den Anforderungen zu genügen.

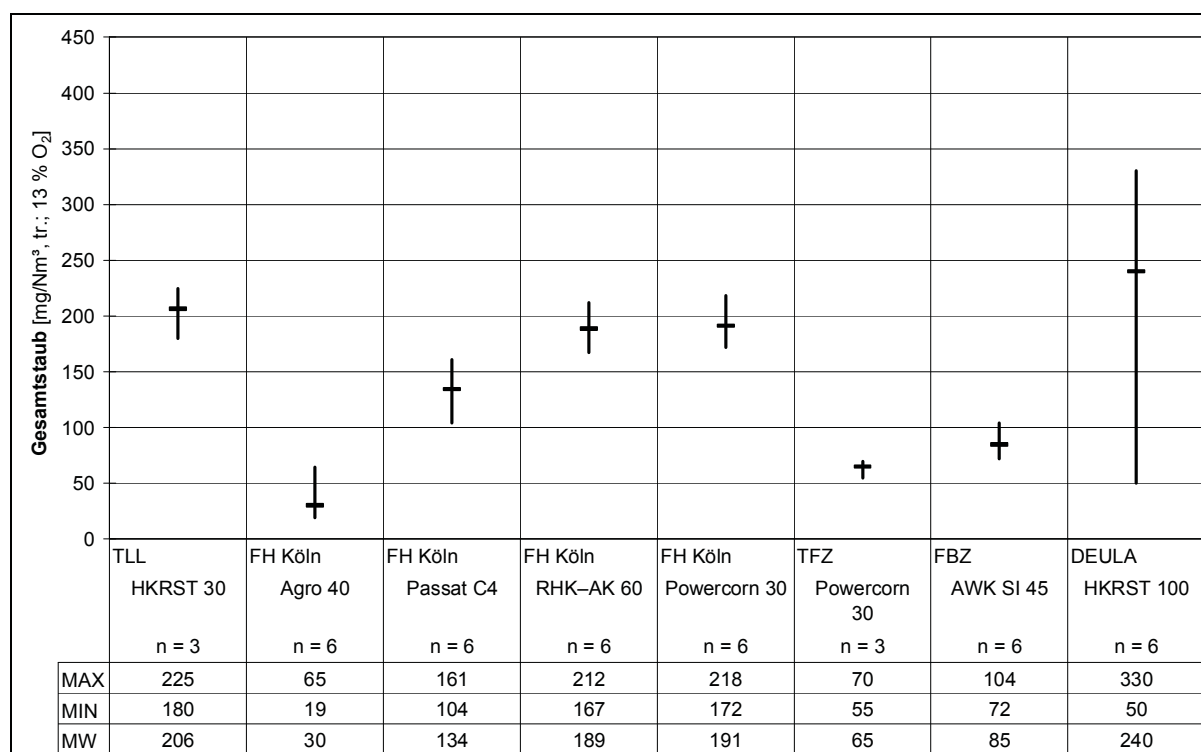


Abbildung 77: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

¹ ab 2006 gilt VDI 2066, Blatt 1

Geht man davon aus, dass die Versuche in entsprechend optimal eingestellten und gewarteten Anlagen durchgeführt wurden, ist für die Festlegung eines Grenzwertes für Praxisanlagen ein Sicherheitsaufschlag anzusetzen. Strehler und Hartmann [44/ und 45/] beziffern den Unterschied zwischen Prüfstands- und Praxisanlagen für Holzfeuerungsanlagen mit einem Faktor von ca. 2,5. Eine Analyse des Marktanreizprogrammes des Bundes (MAP) [45/] von 2007 für Pellet- als auch Scheitholzkessel verdeutlicht, dass der nach den Förderkriterien des Bundesamtes für Ausfuhrkontrolle (BAFA) geforderte zulässige Staubwert für Prüfstandsmessungen von 50 mg/Nm³ deutlich unterschritten wird. Dieser Wert entspricht damit bei Faktor 2,5 einem durch die Experten abgeschätzten einzuhaltenden Praxiswert von ca. 125 mg/Nm³. Es wird aus den Ausführungen weiterhin klar, dass auch ein Praxiswert von 100 mg/Nm³ (s. 1. Stufe Novelle 1. BImSchV) für Holzfeuerungsanlagen mit einem Großteil der förderungswürdigen Anlagentechnologien einhaltbar sind. Eine noch weitere Absenkung dieses Praxiswertes auf etwa 20 mg/Nm³ (s. 2. Stufe Novelle 1. BImSchV) würde allerdings die Anzahl uneingeschränkt einsetzbarer Technik, ohne Sekundärmaßnahmen, auf teilweise unter 10 % senken. Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Messergebnisse der verfügbaren, bzw. besten verfügbaren Techniken für die Verbrennung von Halmgütern zeigen, dass einzelne Technologien bzw. bei ausgewählten Halmgutbrennstoffen auch ein erweiterter Kreis von Techniken die Grenzwerte gemäß EN 303-5 sowie die Anforderungen der 1. BImSchV, als auch etwas höhere Anforderungen durchaus erfüllen können.

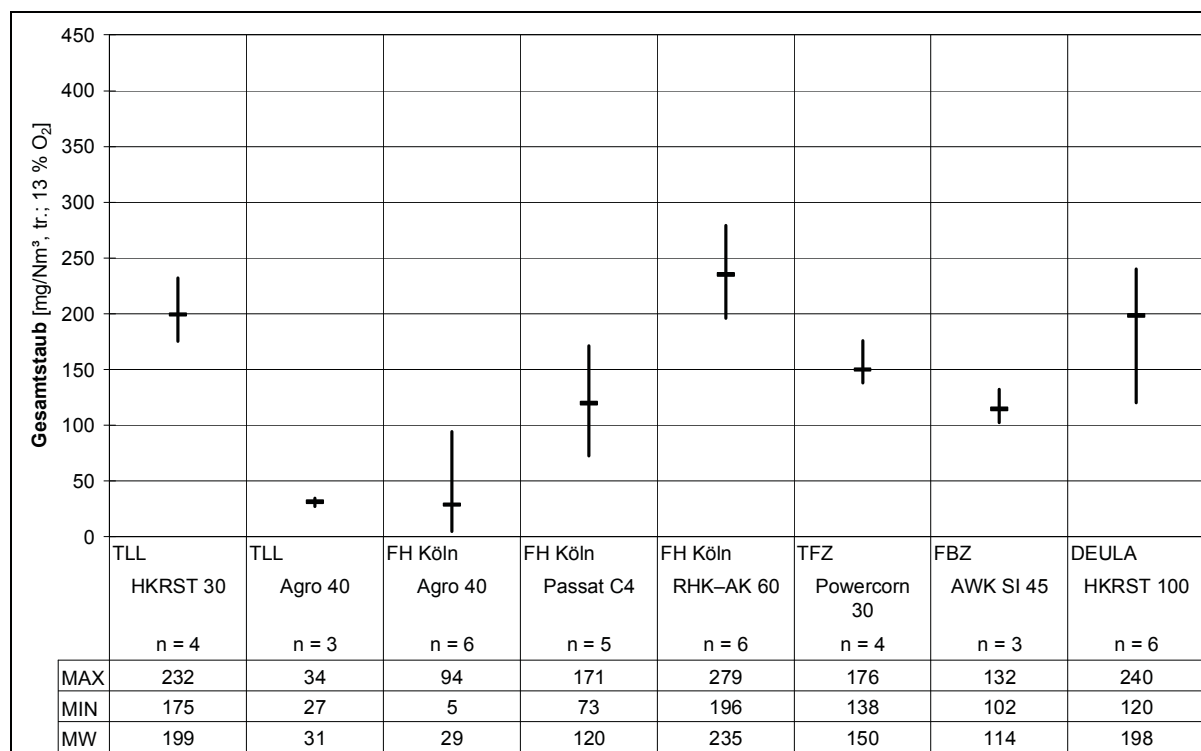


Abbildung 78: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die im Rahmen der Novellierung formulierten Anforderungen zur Staubminderung für Holzfeuerungsanlagen sind jedoch nicht undifferenziert für Halmgutfeuerungsanlagen anzuwenden. Die Höhe der Staubgrenzwerte der 1. Stufe mit $0,10 \text{ g/Nm}^3$ würde die Anzahl der am Markt befindlichen Anlagenhersteller bzw. einsetzbaren halmgutartigen Brennstoffe drastisch einschränken. Die Anforderungen der 2. Stufe übersteigen klar die Möglichkeiten der gegenwärtig am Markt verfügbaren Technologien.

Während für die untersuchten Getreidekörnerchargen eine klare Abhängigkeit der Staubemissionen von der gewählten Anlagentechnologie erkennbar ist (s. Abb. 77 und 78), zeigen die untersuchten Strohpelletchargen eine klare Brennstoffabhängigkeit (s. Abb. 79 und 80). Die Ursache liegt dabei, wie im Kapitel 2.3.3 beschrieben, in den höheren Anteilen staubbildender Inhaltsstoffe. Dies führte dazu, dass für den Regelbrennstoff Winterroggenstrophpellets (WRSP RB) lediglich an einer Anlagentechnologie der Nachweis der Einhaltung des gesetzlich geforderten Grenzwertes erbracht werden konnte (s. Abb. 80). Im Gegensatz dazu wurde beim Einsatz des Referenzbrennstoffes Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) mit einer Ausnahme, die Genehmigungsfähigkeit aller untersuchten Technologien nachgewiesen. Selbst die Einhaltung der in der Novelle der 1. BImSchV in Stufe 1 formulierten höheren Anforderungen ($0,10 \text{ g/Nm}^3$) konnte für diese Anlagen nachgewiesen werden (s. Abb. 79). Die Ursachen der aufgezeigten Ausreißer an einer Anlage sind bereits im Kapitel 3.2.1 beschrieben und lassen sich auf ein spezielles Betreiberverhalten bzw. Defekte der Düsenlanzen zurückführen.

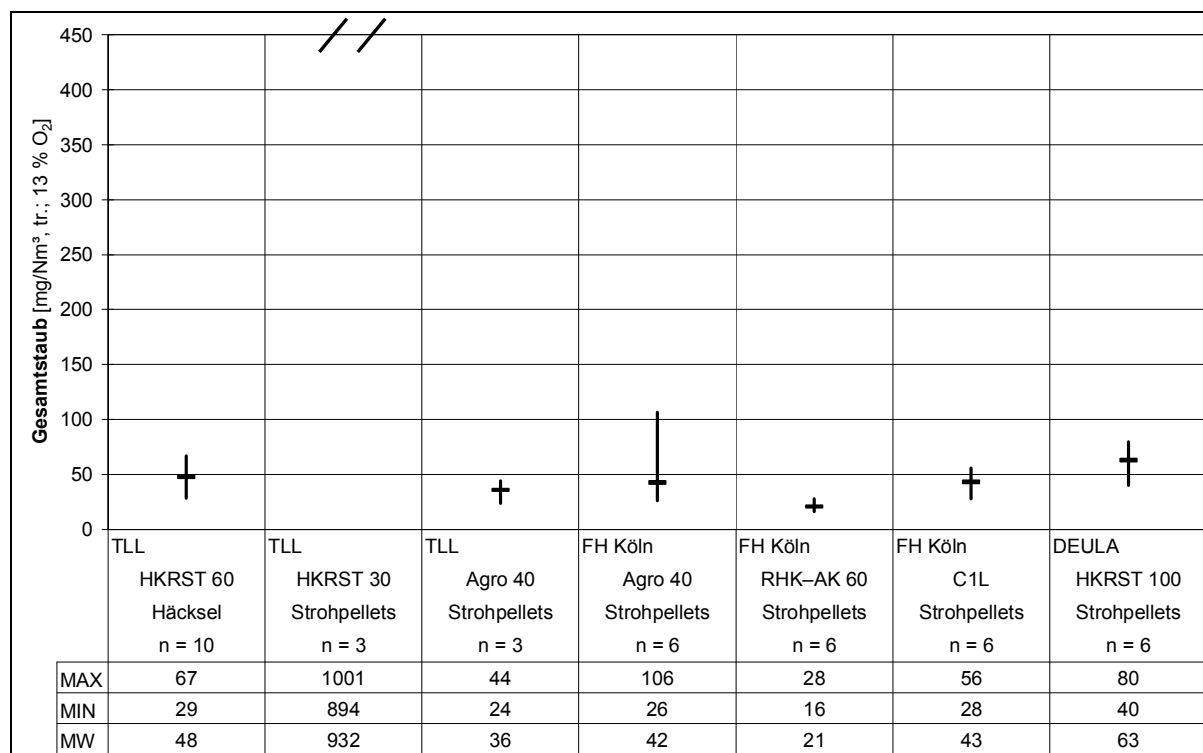


Abbildung 79: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

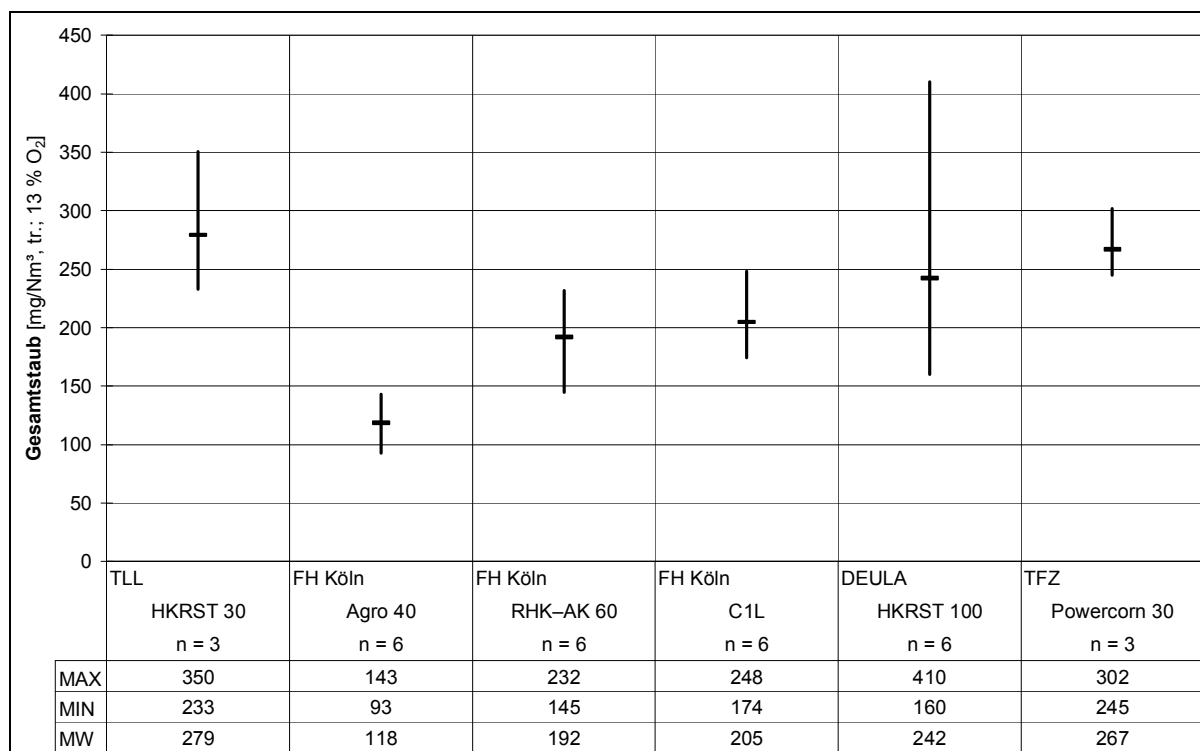


Abbildung 80: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundemittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Selbst die besten drei Technologien aus den mit Referenzbrennstoffen untersuchten Anlagen überschreiten bei ausgewählten Brennstoffen teilweise die Staubgrenzwerte der bisherigen Verordnung (s. Abb. 81). Dabei ist anzumerken, dass der Anlagenhersteller des Powercorn 30 seinen Kessel nicht für Winterweizenkörner sowie Strohpellets freigegeben hat. An der Anlage Agro 40 konnten unabhängig vom Brennstoff die besten Ergebnisse nachgewiesen werden. Es wird klar, dass eine weitere Differenzierung der Bewertung als auch der Einteilung der Halmgutbrennstoffe notwendig ist, um die verfügbaren Technologien und den Stand der Technik, als Grundlage zur Festlegung realistischer Grenzwerte heranziehen zu können.

Die Etablierung eines Brennstoffqualitätsmanagementsystems bzw. die Entwicklung von Staubminderungsmaßnahmen ist bei den gegenwärtigen Entwicklungen der rechtlichen Rahmenbedingungen unumgänglich. Im Rahmen des FuE-Teils des Projektes der TLL wurden dazu durch den Unterauftragnehmer ILK in der Planungsphase des Projektes für konventionelle Feuerungssysteme vorgesehene Abscheidetechnologien entwickelt, erprobt und angepasst (vgl. Kapitel 3.2.1.1). Weitere Ansätze zur Staubminderung sind im Kapitel 4 zusammenfassend dargestellt.

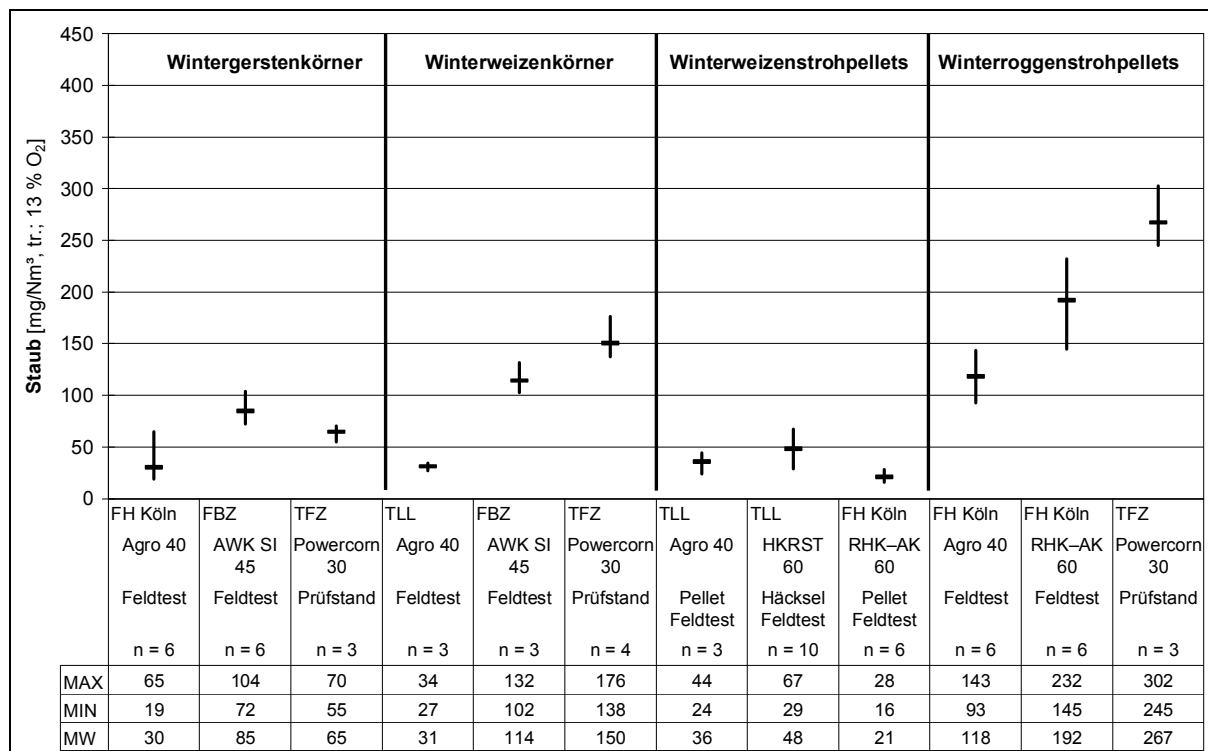


Abbildung 81: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war die Entwicklung der Staubemissionen in Abhängigkeit von der Laststufe. Dazu wurden während der Feldtests der FH Köln bzw. des FBZ entsprechende Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 82 bis 88 sowie in Tabelle 25 zusammenfassend dargestellt. Es wird dabei deutlich, dass allgemein geringere Staubkonzentrationen bei geringerer Laststufe zu erwarten sind, was im Wesentlichen auf geringere Abgasgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass sich bei schlechteren Ausbrandergebnissen (vgl. Kapitel 3.2.1) im Zusammenhang mit höheren Kohlenmonoxidemissionen ein entgegengesetztes Resultat ergeben kann. Dies wird auf höhere Anteile unverbrannter Abgasbestandteile zurückgeführt.

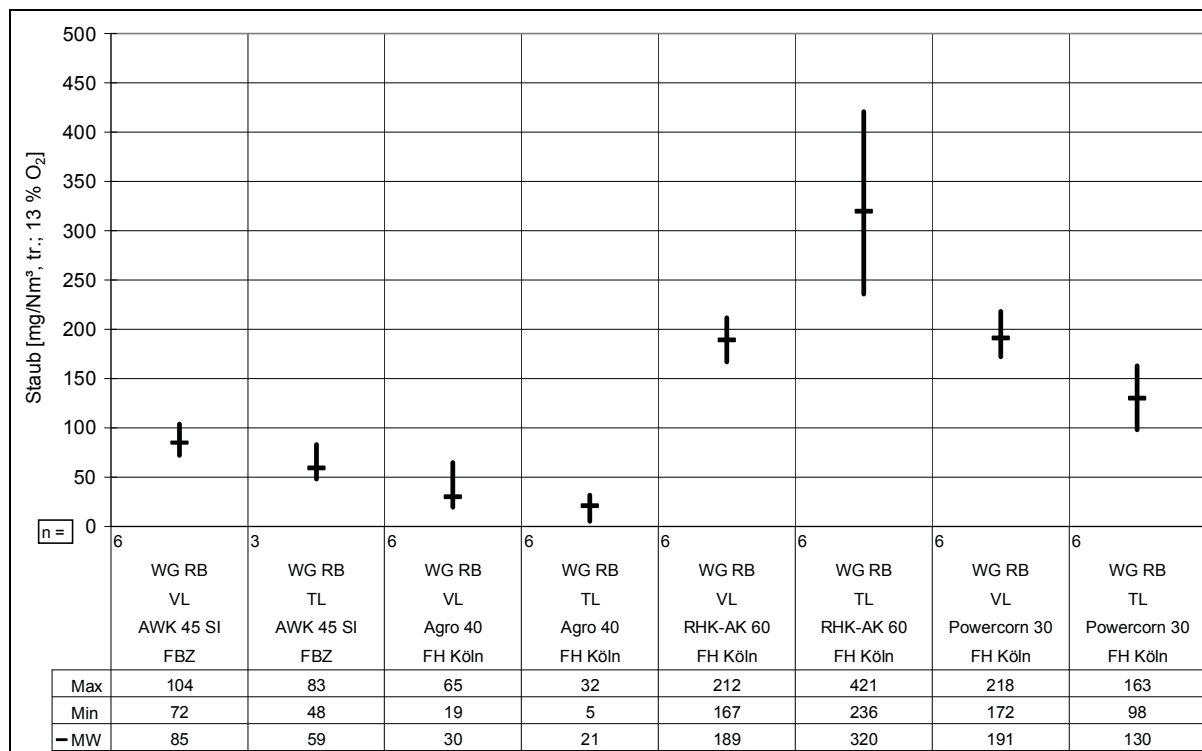


Abbildung 82: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerstenkörner (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

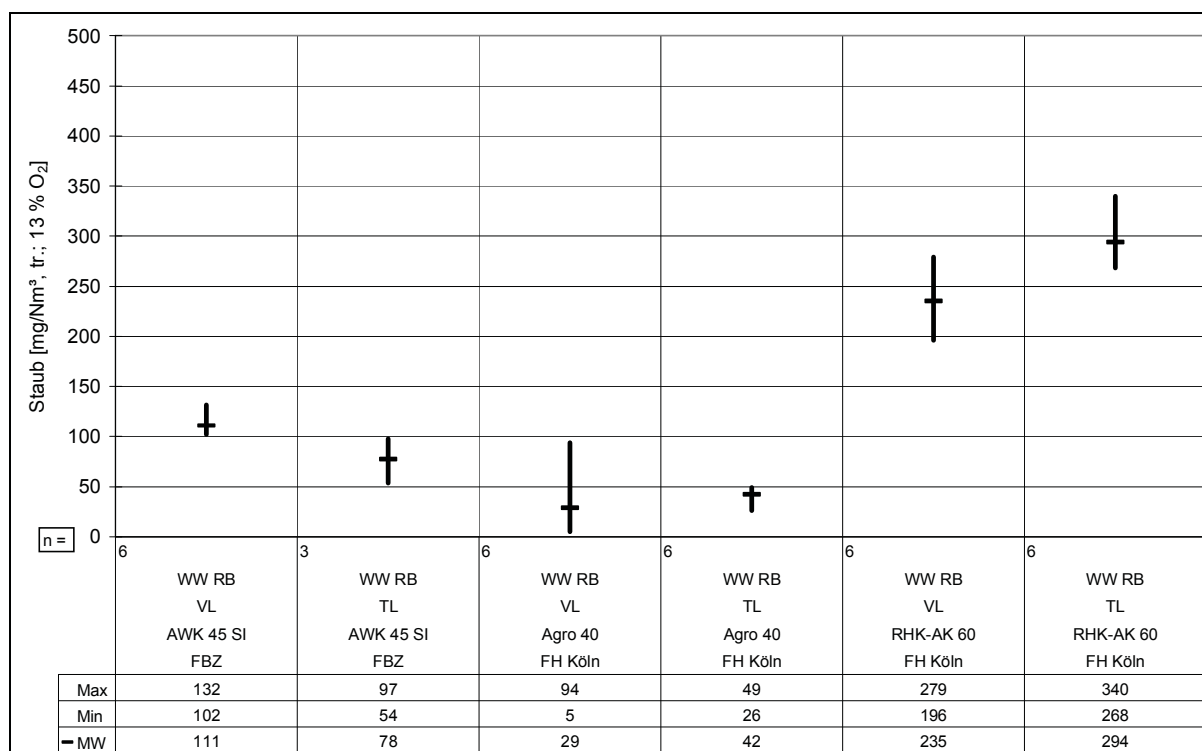


Abbildung 83: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenkörner (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

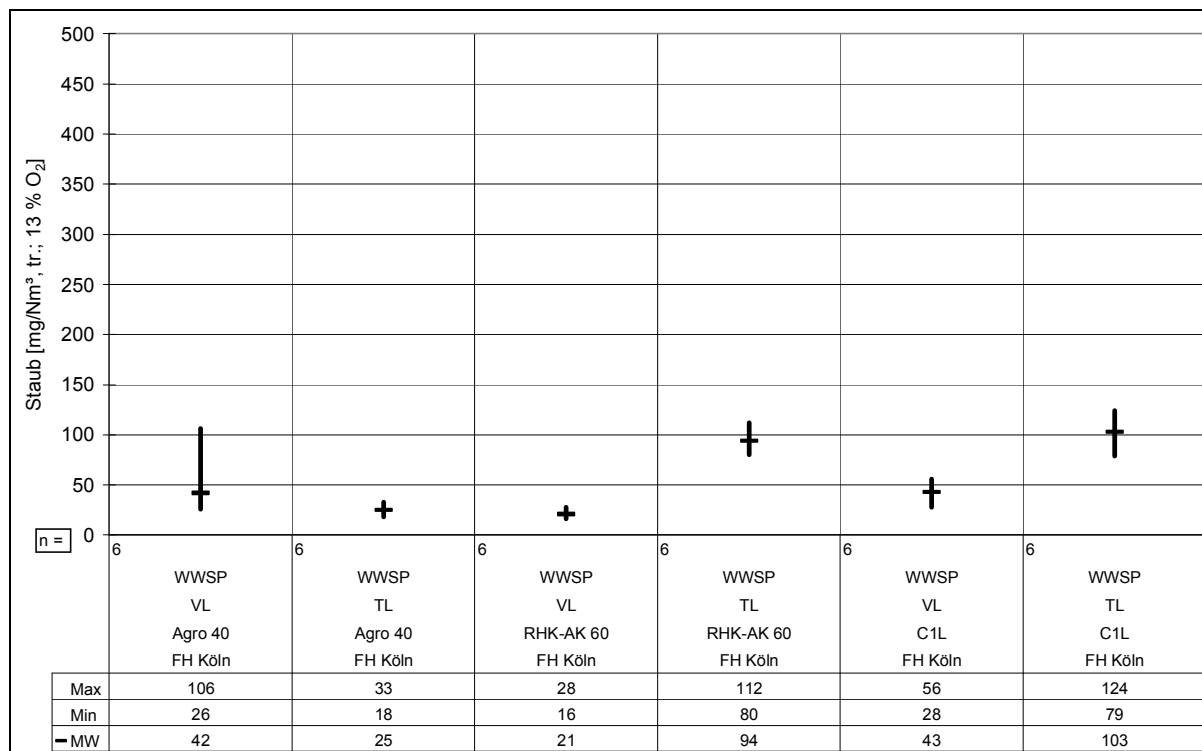


Abbildung 84: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

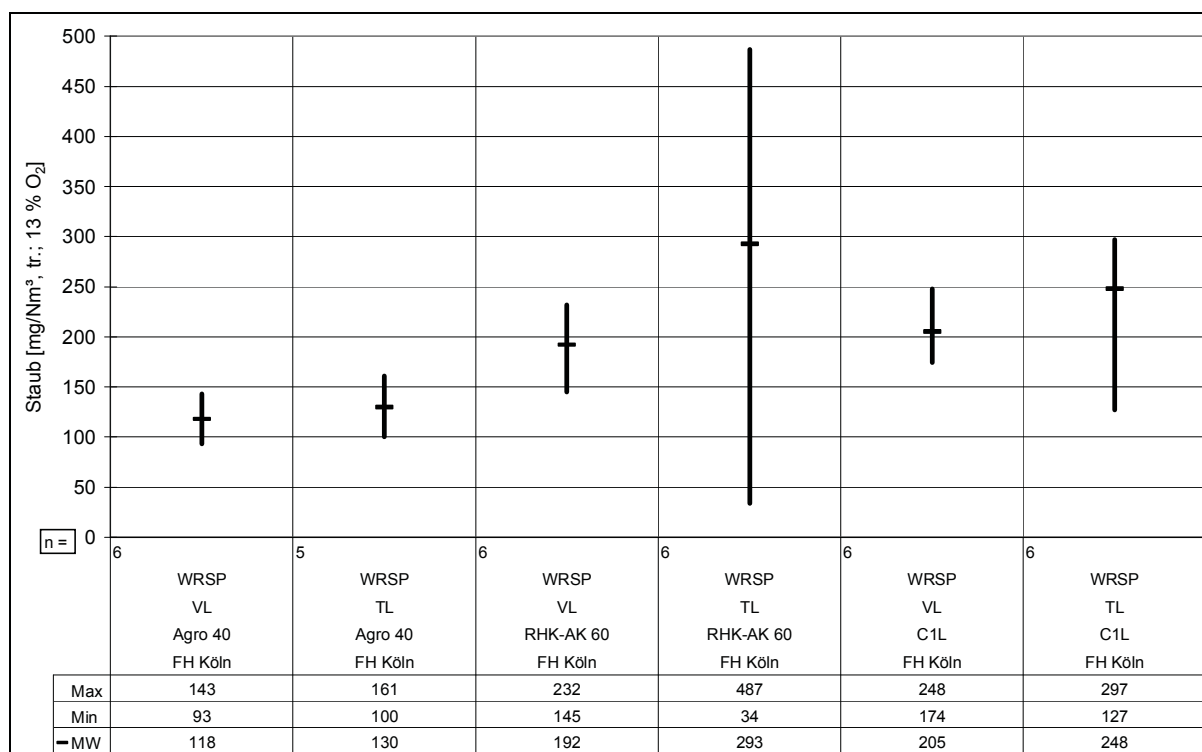


Abbildung 85: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/10/ und /11/]

Ergänzend zu den Versuchen zur Ermittlung der Gesamtstaubemissionen wurden an zahlreichen Anlagentechnologien die Verteilung der Korngrößen ermittelt. Die Untersuchung der Anteile der Korngrößenfraktionen am Gesamtstaub (vgl. auch Kapitel 3.1) ergab ein relativ einheitliches Bild. Typischer Weise sind über 90 % der Partikel im Abgas dem Größenbereich PM 2,5 zuzuordnen (s. Abb. 86). Der übrige Anteil gliedert sich auf die Fraktionen $2,5 \mu\text{m} < x \leq 10 \mu\text{m}$ und größer PM 10 auf. Dabei bestehen für die Fraktionsanteile innerhalb der beprobten Brennstoffe sowie innerhalb der Einzelmessungen keine nennenswerten Unterschiede.

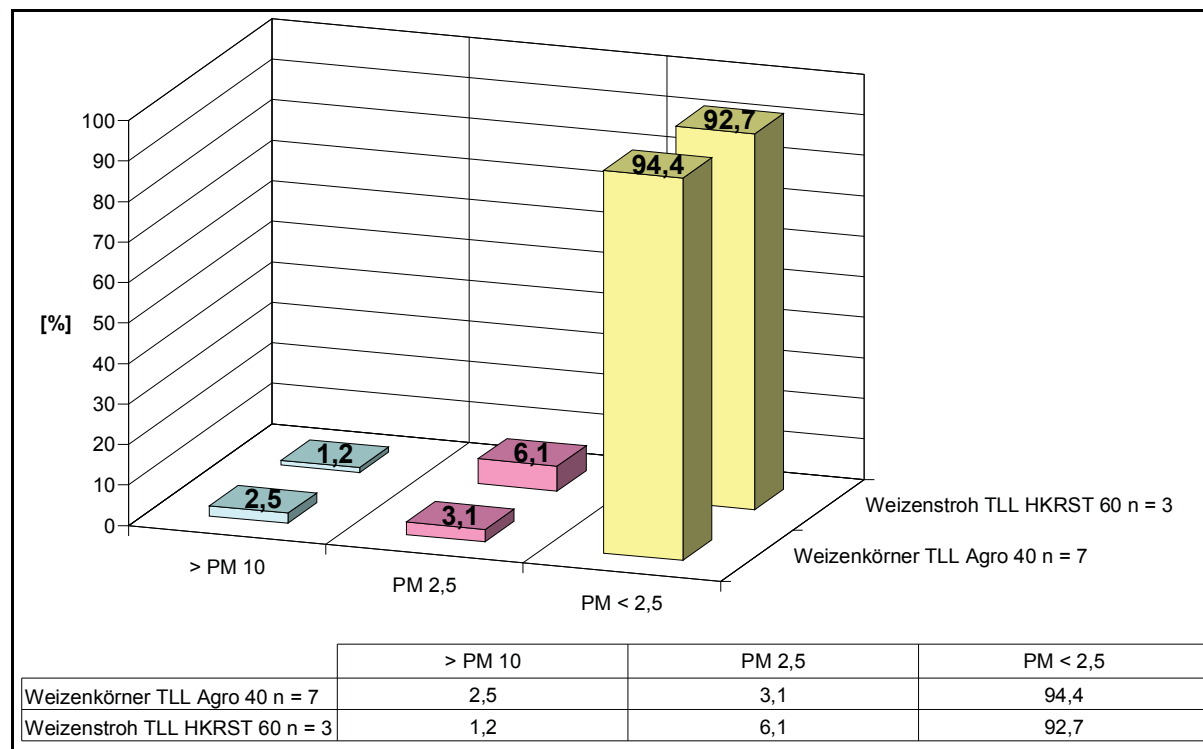


Abbildung 86: Vergleich der Anteile der Korngrößenfraktionen anfallender Stäube in besonders geeigneten Halmgutfeuerungsanlagen Brennstoffe: WWSH RB und WW RB, Korngrößenverteilung hier dargestellt als > PM 10 (Partikel $> 10 \mu\text{m}$); PM 2,5 (Partikel $2,5 < x \leq 10 \mu\text{m}$); PM < 2,5 (Partikel $\leq 2,5 \mu\text{m}$)

Vom FBZ durchgeführte Versuche zur Abhängigkeit der Feinstaubverteilung von Getreidekörnern vom Lastzustand zeigten nur geringe Schwankungen (s. Tab. 25). Hier wurden für eine weitergehende Beurteilung noch Messungen mit DIN-Holzpellets (DIN HP) durchgeführt. Der Vergleich zeigt, dass die Korngrößenverteilung der untersuchten Getreidekörnerchargen (Referenzbrennstoff: WG RB und WW RB) vergleichbar mit denen der Holzpellets ist.

Tabelle 25: Vergleich der Korngrößenverteilungen in Abhängigkeit vom Lastzustand [11]

	WG RB	WG RB	WW RB	WW RB	DIN HP	DIN HP
	VL	TL	VL	TL	VL	TL
PM ₁₀	98,09	98,01	97,77	97,94	97,5	93,7
PM ₄	94,17	93,18	93,06	92,37	91,5	87,4
PM _{2,5}	91,86	89,14	90,24	88,31	89,3	85,6
PM ₁	74,97	69,7	79,44	73,64	83,2	81,4

Fazit

Im Sinne eines vorbeugenden Immissionsschutzes ist neben der Minimierung der Staubemissionen das Gefährdungspotential und die toxische Relevanz der entstehenden Stäube einzuschätzen. Dabei ist, neben der insgesamt etablierten Anlagenzahl (Einzelraumfeuerstätten / Zentralfeuerungskessel) als eines der wichtigsten Kriterien, die Qualität des Ausbrandes (CO-Emissionen) in Betracht zu ziehen. Dahingehend wurde von verschiedenen Institutionen und zahlreichen Projekten festgestellt [1/, 2/, 3/ 18/, 20/], dass die Qualität der Verbrennung von Halmgutbrennstoffen in geeigneten Anlagen mit den besten Holzfeuerungsanlagen vergleichbar ist. Eine damit zu erwartende geringere Toxizität der entstehenden Stäube gegenüber Stäuben aus konventionellen Holzfeuerungsanlagen bzw. Dieselruß, wurde bereits prinzipiell für Holzfeuerungsanlagen durch Klippel und Nussbaumer nachgewiesen [46/] und wird gegenwärtig speziell für Halmgutbrennstoffe in weiteren noch laufenden Forschungsprojekten untersucht.

3.2.2.1 Entwicklung und Testung neuartiger und kostengünstiger Staubabscheidetechnologien (FuE Teil TLL / ILK [/1/])

Im ILK wurden zunächst theoretische, sowie praktische Untersuchungen zur Entstehung von Partikeln bzw. Stäuben bei der Verbrennung durchgeführt. Als Ergebnis stellte sich dar, dass dabei die Partikel der vollständigen Verbrennung gegenüber den Partikeln der unvollständigen Verbrennung (Ruß) überwiegen. Erstere entstehen aus verschiedenen Prozessen der Zusammenlagerung von anorganischen Aerosolen. Sie bilden Feinstaubpartikel, die den Hauptanteil der staubförmigen Emissionen darstellen. Weiterhin konnte herausgearbeitet werden, dass Kaliumchlorid (KCl) und Kaliumsulfat (K_2SO_4) die Hauptbestandteile dieser Teilchen sind. Verschiedene Staubfilterpapiere wurden einer chemischen Analyse unterzogen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich für eine repräsentative Probe, genommen bei der Verbrennung eines Heubrennstoffs, bei Addition der Massenanteile von K, Cl^- und SO_4^{2-} (Sulfate) eine Summe von 97,4 Masse-% ergab. Vergleichbare Ergebnisse erzielten auch Kaufmann und Nussbaumer in [/47/].

Auf dieser Grundlage werden die Elemente Kalium, Chlor und Schwefel als Hauptursache für die Entstehung der für halmartige Brennstoffe erhöhten staubförmigen Emissionen gesehen (vgl. auch [/28/]). Die Partikel lagern sich auch durch thermophoretische Kräfte an Wänden und am Wärmeübertrager des Heizkessels an. Die 1. BImSchV begrenzt in § 6 Abs. 1 Nr. 2 a) die Konzentration von staubförmigen Emissionen bei dem Einsatz von Stroh oder strohähnlichen Stoffen auf 0,15 mg/Nm³ i. tr. Abgas bezogen auf 13 Vol. % O₂ (Nennwärmeleistung 15 - 100 kW). Um der Entstehung dieser Emissionen (ohne den Einsatz eines Abscheiders) entgegenzuwirken, kommen nach bisherigen Erkenntnissen primärseitig nur zwei Wege in Betracht:

1. die Gehalte an K, Cl bzw. S im Brennstoff müssen reduziert werden
2. es muss versucht werden, die bereits entstandenen anorganischen Dämpfe bzw. Aerosole in die Brennraumasche einzubinden.

Für die chemische Analyse der Verbrennungsrückstände wurden Proben von verschiedenen Orten eines Heizkessels entnommen:

- Beladene Filterpapiere aus Rauchgasmessungen
- Brennraumasche (Bez. Mischprobe 1/3 Mix) - zu gleichen Teilen direkt vom Rost, von der Fläche hinter dem Rost bzw. der Aschemulde und aus eventuellen Schlacketeilen gemischt
- Kratzprobe Nachbrennraum
- Asche Nachbrennraum
- Kratzprobe Brennraum.

Ihre Auswertung erfolgte im hauseigenen Labor des ILK durch Ionenchromatographie (Anionen) und Atomemissionsspektrometrie (Kationen). Die Analysewerte zeigen die

typischen Erhöhungen von K, Cl⁻ und SO₄²⁻ vor allem im Staub der Filterpapiere sowie den Kratzproben der Seitenwand im Nachbrennraum. Auch für die Asche, die bei der Reinigung des Wärmeüberträgers anfiel und für eine Kratzprobe von der Schamottwand im Brennraum sind diese höheren Konzentrationen feststellbar. Allerdings sind die Erhöhungen gegenüber den Filterpapieren und den Kratzproben des Nachbrennraums nicht so deutlich. Eine Senkung der Kesselleistung auf rund 75 % (80 kW) zeigte parallel zur Gesamtstaubkonzentration keine Auswirkungen auf die Gehalte der untersuchten Anionen bzw. Kationen im Filterstaub. Aus dem Verhältnis der Analysewerte zwischen der Asche des Nachbrennraums und den Anhaftungen im Nachbrennraum (Wände) kann die Anreicherung genannter Verbindungen in den haftenden Feinstäuben deutlich gemacht werden:

Tabelle 26: Massenverhältnisse charakteristischer Elemente im Vergleich [1/1]

Massenanteile		
	Asche	haftende Feinstäube
K	1	3,7
Cl ⁻	1	5,8
SO ₄ ²⁻	1	2,7

Parallel zur Austragung von Kalium in den partikelförmigen Emissionen und der Flugasche bzw. Anhaftungen im Nachbrennraum sowie Wärmeüberträger wird das Element auch unterschiedlich gut in die Brennraummasche eingebunden. Aus den chemischen Analysen geht hervor, dass zwischen 38,2 Massen-% und 76,3 Massen-% des emittierten Staubes aus den Elementen K, Cl und S besteht.

Weiterhin konnte durch aufwendige Reinigung des Heizkessels aus Wägung der separierten Stäube eine Bilanz für Kalium als Inhaltsstoff der partikelförmigen Emissionen erstellt werden. Dabei gilt als Eintragungspfad der Brennstoff. Die Austragungspfade werden aufgegliedert in die Brennraummasche, Anhaftungen bzw. Flugasche im Nachbrennraum, Ablagerungen im Wärmeüberträger sowie die partikelförmigen Emissionen. Es wurde vorausgesetzt, dass sich kein Kalium in der Gasphase der Emissionen befand. Das Ergebnis zeigt das Diagramm in Abbildung 87 für die Zeitdauer einer Staubbmessung (30 min) aufgestellt. Dazu wurde der Eintrag an Kalium durch den Brennstoff während der Staubbmessung auf 100 % gesetzt. Entsprechend der chemischen Analysen und Wägung der anfallenden Mengen an Rückständen für die einzelnen Probenahmeorte konnte der jeweilige Anteil ermittelt werden. Weiterhin zeigten sich bei der Auswertung hohe Konzentrationen von Phosphaten im Filterstaub und den Kratzproben des Nachbrennraums.

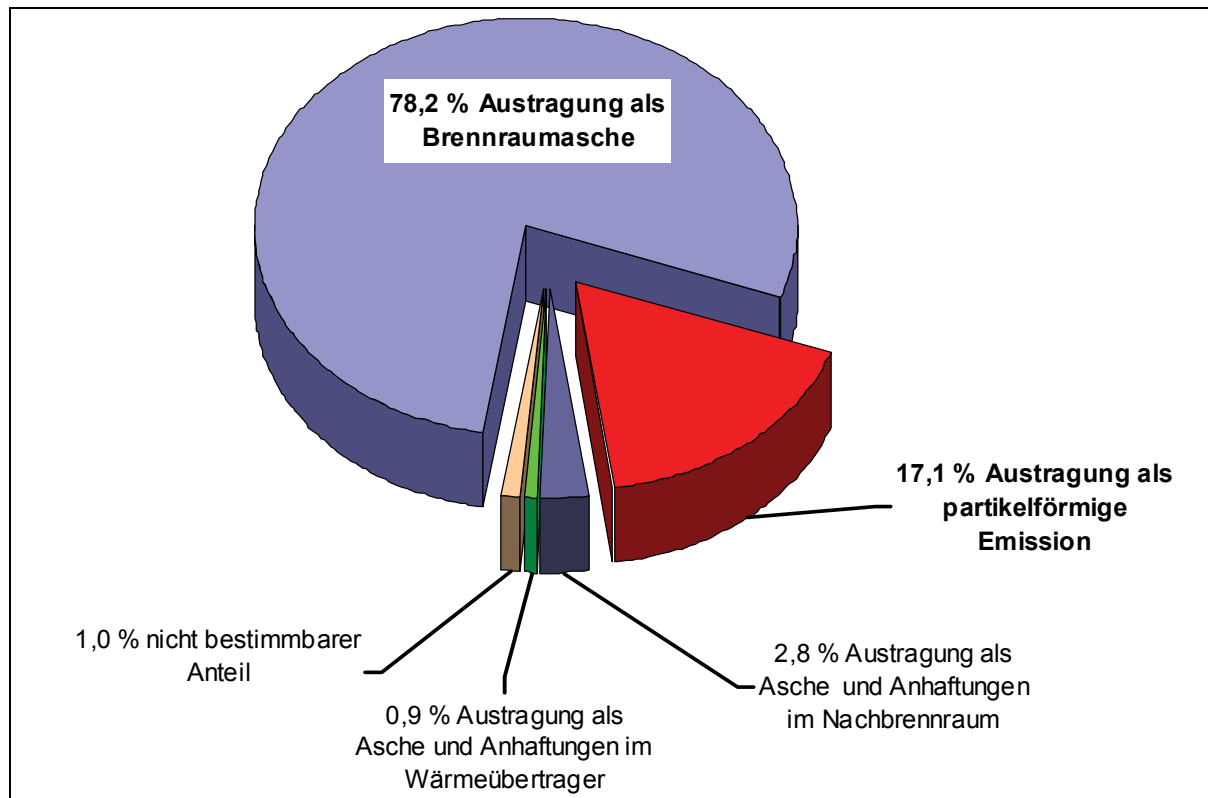


Abbildung 87: Kaliumbilanz eines Pellet-Brennstoffs aus Roggenstroh [1/]

Die Auslegungsgrundlagen, theoretischen Betrachtungen zur Abscheidewirkung elektrostatischer Kräfte, die Berechnungsformeln für den Elektroabscheider sowie die Bau- und Ausführungsformen (Konzeption und Auslegungsuntersuchungen) werden im Abschlußbericht des ILK [1/] ausführlich beschrieben.

Die Praxisanlagen in Dobia (Reka - HKRST 30) und Zottelstedt (Reka - HKRST 60) fallen durch ihre Nennleistungen in den Geltungsbereich der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, die 1. BImSchV. Damit ist ein Emissionsgrenzwert für Staub von $0,15 \text{ g/Nm}^3$ bezogen auf 13 Vol. % O_2 zu unterschreiten. Bei der Auslegung der Abscheider wurden nach den ersten Praxismessungen Staubkonzentrationen unterhalb von 300 mg/Nm^3 zu Grunde gelegt. Es wurde dazu ein, bereits im Auftrag der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft entwickelter, elektrostatischer Filter weiterentwickelt und in der Praxis eingesetzt und modifiziert. Der Abscheider wurde bei einem Rauchgasvolumenstrom von $40 \text{ Nm}^3/\text{h}$ mit einem durchschnittlichen Staubgehalt von 200 mg/Nm^3 erprobt. Die Untersuchung der Korngrößenverteilung im Rohgas ergab, dass hauptsächlich Partikel mit einem Durchmesser von $0,04$ bis $0,35 \mu\text{m}$ vorhanden sind.



Abbildung 88: Filterröhre mit Sprühdraht und Korona-Entladung [1/1]

Das verwendete Elektrofilterprinzip (Röhrenfilter) ist für Feinst-Stäube gut geeignet. Bei angelegten Spannungen von 12 bis 20 kV werden Abscheidegrade von 94 bis 99 % erreicht. Damit werden durchschnittliche Reingasstaubgehalte von 9 mg/m^3 erreicht (s. Abb. xx).

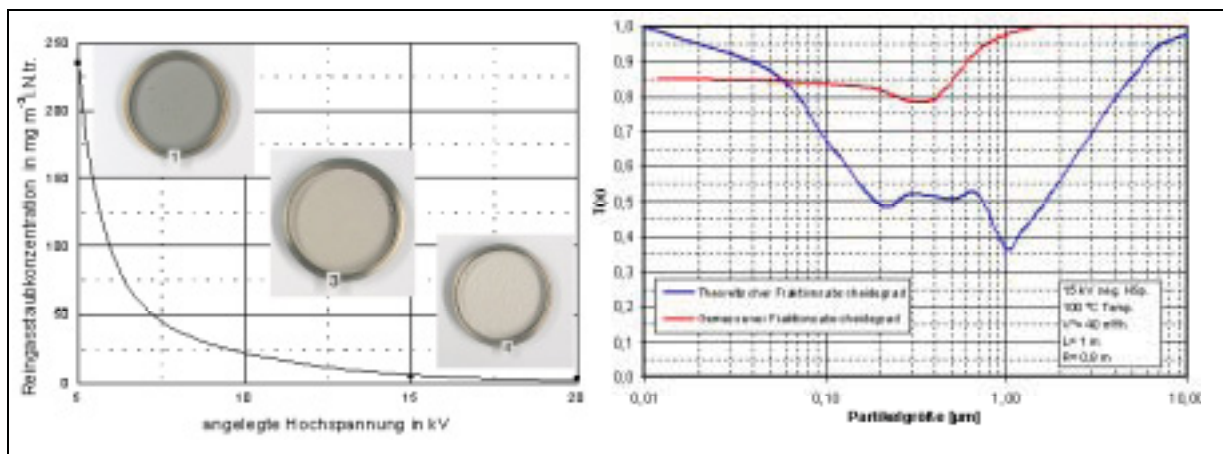


Abbildung 89: Erzielte Abscheidegrade mit dem Röhrenelektrofilter (links), Vergleich der theoretischen und gemessenen Fraktionsabscheidegrade des Röhrenelektrofilters (rechts) [1/1]

Mit höherer Spannung wird eine bessere Abscheidung erreicht. Negative Potentialdifferenz ist effizienter als positive. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Stäube ein enormes Haftungspotential besitzen und sich durch abklopfen nicht ausreichend von der Niederschlagselektrode entfernen lassen. Daher wurde ein Verfahren der Abreinigung mittels Druckluftimpuls, sowohl für die Niederschlagselektrode als auch für die Sprühelektrode gewählt. Bei der Untersuchung des Fraktionsabscheidegrades wurde ein charakteristisches Minimum zwischen 0,1 und 1 μm festgestellt (s. Abb. 89). Der gemessene Fraktionsabscheidegrad ist recht hoch und liegt über den in der Theorie berechneten Werten. Auch die ermittelten mittleren Wanderungsgeschwindigkeiten sind größer als die theoretisch berechneten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckluftabreinigung noch weiter optimiert werden muss. Positiv auf die Reinigung haben sich die Beschichtung der

Niederschlagselektrode und die Verwendung von Polytetrafluorethylen (PTFE) für die Hochspannungsversorgung und das Spanngewicht ausgewirkt. Der elektrostatische Abscheider stellt eine gute Lösung für die Staubabscheidung des betrachteten Rauchgases für Kleinkessel mit einer Leistung unter 50 kW dar. Der Abscheider wurde so gestaltet, dass durch eine mehrfache Strömungsumkehr die Filterröhre weitgehend vor groben Partikeln und Kondensations-Erscheinungen geschützt wurde. Industrieelektrofilter werden immer knapp unter der Durchschlagsspannung betrieben, da hier die Wirksamkeit und die Abscheidegrade am größten sind. Im vorliegenden Fall war eine andere Herangehensweise erforderlich. Der Abscheider soll sicher unterhalb der Durchschlagsspannung betrieben werden. Die Hochspannung soll auf einem möglichst niedrigen Niveau liegen. Allerdings soll eine so hohe Feldstärke erreicht werden, dass eine ausreichende Abscheideleistung erzielt werden kann. Weiterhin ist für eine gute Abscheideleistung das möglichst vollständige Erreichen der Sättigungsladung anzustreben. Die notwendige Aufladezeit im Elektrofilter ist abhängig von der Stromdichte, d.h. dem Strom bezogen auf die Fläche der Niederschlagselektrodenfläche.

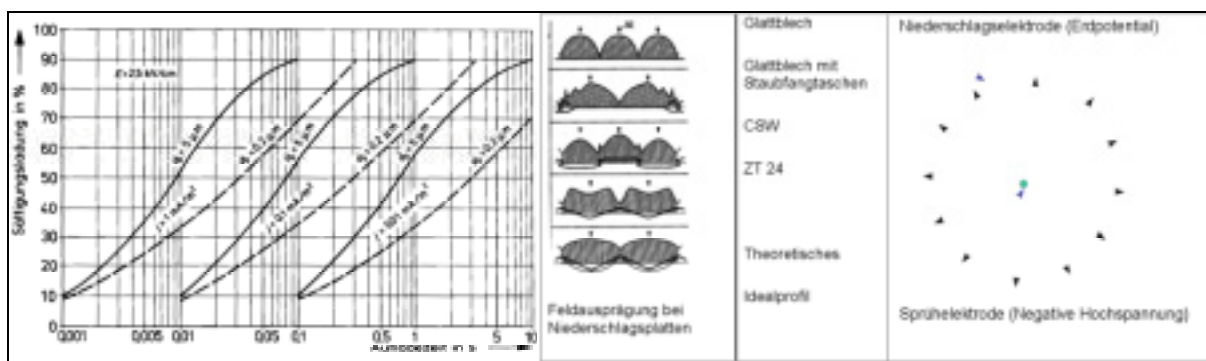


Abbildung 90: Sättigungsladung als Funktion der Aufladezeit und der Stromdichte (links) und Feldausprägung bei Platten- und Rohrelektrofilter (rechts) [1/1]

Abbildung 90 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der Sättigungsladung als Funktion der Aufladezeit, der Partikelgröße und der Stromdichte. Aus der Darstellung geht hervor, dass das Erreichen der Sättigungsladung bei kleineren Partikeln eine größere Aufladezeit bedingt. Weiterhin ist die Aufladezeit der Stromdichte umgekehrt proportional. Für den vorliegenden Einsatzfall mit mittleren Partikelgrößen im Bereich von $0,2 \mu\text{m}$ und einer sehr geringen technisch machbaren Aufladezeit gilt es also, eine möglichst große Stromdichte und Feldstärke zu realisieren. Bei Strömungsgeschwindigkeiten von $0,8 \text{ m/s}$ und der anzusetzenden Baugröße kann von Aufladezeiten unter $0,5 \text{ sec.}$ ausgegangen werden. Es sind daher Stromdichten von mindestens 1 mA/m^2 bei Feldstärken oberhalb von $2,5 \text{ kV/cm}$ umzusetzen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Abscheideleistung eines Elektrofilters hat auch die Form der Niederschlagselektroden. Abbildung 90 zeigt weiterhin die verschiedenen Feldausprägungen bei Platten- und Rohrelektrofiltern. Günstig für eine hohe Abscheideleistung ist eine gleichmäßige Stromdichteverteilung über den Elektrodenflächen.

Ein Röhrenfilter ist dabei von der Geometrie begünstigt, da die Feldlinien radial nach außen gehen und zu einer gleichförmigen Stromverteilung führen.



Abbildung 91: Abscheiderkonstruktionsschema (links) Innenraum mit 3 Gasröhren und Füllkörperfüllung (mitte, mitte), Schütttschicht Patronen (mitte, unten), Praxisanlage (rechts) [/1/]

Eine Erstmessung an der Anlage HKRST 60 zeigte ein überraschend niedriges Niveau für Gesamtstaub im Rauchgas von ca. 30 - 40 mg/Nm³ bezogen auf 13 Vol. % O₂. Als mögliche Ursachen dafür kamen eine intermittierende Betriebsweise und die bis dahin erst geringe Betriebszeit des Heizkessels in Betracht. Es wurden daher bei späteren Untersuchungen die Messungen wiederholt und erneut die geringen Staubbeladungen des Abgases nachgewiesen. Eine ungleichmäßige Partikelverteilung in der Messebene konnte durch die Messung in mehreren Achsen ausgeschlossen werden. Der Abscheider wurde mit einem zylindrischen Aufbau und einem erhöhten Gasdurchsatz von 250 Bm³/h konzipiert. In seinem Inneren liegen 3 röhrenartige Abscheideelemente mit variablen Einsatz (s. Abb. 91 mitte, mitte). Sie können mit einer Sprühelektrode zur Nutzung des elektrostatischen Abscheideeffektes (s. Abb. 88) oder einer Schüttung z.B. aus speziellen Edelstahl lamellenkörpern betrieben werden. Als Material wurde hochlegiertes Stahlblech 1.4571 eingesetzt um Korrosion vorzubeugen und eine Standzeit von etwa 10 Jahren zu erreichen. Die Gesamtanlage ist so konzipiert, dass das Abscheidesystem über eine Rauchgasweiche in den Abgasweg eingekoppelt ist. Für Wartungszwecke oder den Betrieb mit Holzpellets kann der Kessel ohne Abscheider betrieben werden. Auf Grund der überraschend niedrigen Staubgehalte im Kesselabgas wurde entschieden, dieses auf

Schütttschichtfilterung (Spezial Edelstahl-Lamellen Füllkörper) basierende Prinzip umzusetzen. Es ergibt sich für entsprechende Staubpartikel ein strömungstechnisches Labyrinth, welches zur Abscheidung führt. Der Abscheider ist so aufgebaut, dass der eigentlichen Hauptabscheidestufe eine Vor- und Nachstufe in Form eines Fliehkraft- und Umlenkabscheiders voran- bzw. nachgeht. Das Abgas strömt zunächst tangential in den äußeren Mantelbereich ein. Dabei werden grobe Staubteilchen wie Flugasche bereits aus dem Abgasstrom abgetrennt und nach unten abgeleitet, da die Geschwindigkeit mit Eintritt in den Abscheider von ca. 12,5 m/s auf 1 m/s fällt. Nachfolgend passiert das Abgas den Schütttschichtfilter (s. Abb. 91 mitte, unten) in vertikaler Richtung von oben nach unten und wird danach wieder um 180° nach oben gelenkt. Durch diese Umlenkung entsteht ein zusätzlicher Abscheideeffekt.

Die ermittelten Ergebnisse verdeutlichen die Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV und bestätigen damit die Genehmigungsfähigkeit einer solchen Anlage (s. Tab. 27).

Tabelle 27: Ergebnisse der Staubemissionsermittlungen mit und ohne Abscheider der HKRST 60 [1/1]

Messung	Anzahl n =	Mittelwert Staubemissionen mg/Nm ³ 13 % Vol. O ₂	Schwankungsbreiten Staubemissionen mg/Nm ³ 13 % Vol. O ₂
Rohgas	3	78,3	66
Reingas	5	65,6	51

Allerdings werden große Schwankungsbreiten innerhalb der Messungen deutlich. Da sich die Randparameter der Verbrennung bei allen Versuchen auf etwa gleichem Niveau bewegten, kann diese Schwankungsbreite nur auf

- Inhomogenitäten im Brennstoff,
- Ablösungen von Staub aus dem Rauchgassystem bzw.
- für Festbrennstofffeuerungen typische zufällige Schwankungen

zurückzuführen sein.

Auf Grund der großen Schwankungsbreiten ist die Ermittlung des Abscheidegrades schwierig. Eine weitaus höhere Anzahl an Messungen bei vergleichbaren Betriebsbedingungen wäre notwendig, um auch die Einhaltung höherer Anforderungen (s. Novelle 1. BImSchV) sicher vorher zu sagen. Es lässt sich für diese Abscheiderausstattung ein erreichbarer Abscheidegrad von etwa 20 – 25 % abschätzen.

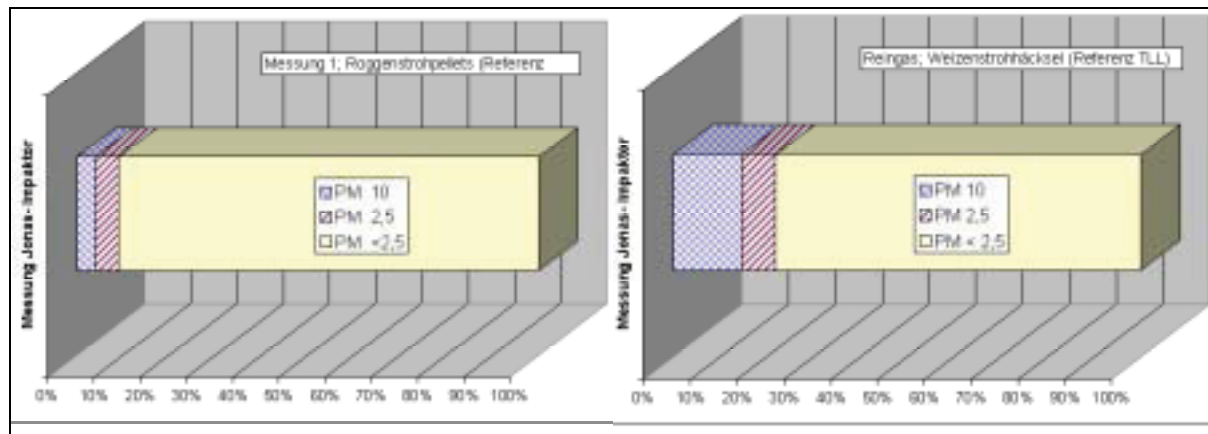


Abbildung 92: Agglomerationseffekte beim Einsatz des Elektrofilters am HKRST 60 [1/]

Weiterhin konnten für die Reingasmessungen Agglomerationseffekte durch den Abscheider nachgewiesen werden. Im Rohgas liegt der Anteil der Größenfraktion $\geq 10 \mu\text{m}$ (PM 10) zwischen 1 und 2 %. Im Reingas nach dem Abscheider konnten PM 10 - Anteile zwischen 10 und 20 % ermittelt werden. In Abbildung 92 ist die Verschiebung der Fraktionsanteile dargestellt. Dadurch werden nachfolgend die Stäube besser abgeschieden.

Für den Einsatz an der Anlage in Zottelstedt (Reka-HKRST 30) wurde ein Abscheider auf Basis des elektrostatischen Prinzips ausgewählt. Als Material wird Edelstahlblech eingesetzt um eine entsprechende Korrosionsfestigkeit zu erzielen. Die Konzeption des Versuchsabscheiders sah den Aufbau aus zwei Stufen vor - einer Vorabscheidestufe und dem eigentlichen Rohrelektrofilter. Mit dem Vorabscheider sollen mehrere Prozessziele erreicht werden:

- Abscheidung größerer Partikel, Schutzfunktion für die Elektrofilter- Röhre,
- Vergleichmäßigung und Beruhigung des Rauchgases, welches dem Elektroabscheider zugeführt wird,
- Temperierung des Elektroabscheiders.

Dazu wird im Außenmantel eine partielle Wirbelströmung erzeugt. Im elektrostatischen Abscheider werden die Feinst-Partikel an der Niederschlagselektrode (NE) abgeschieden. Zusätzlich wird die Gasströmung mehrfach umgelenkt, so dass Agglomerationseffekte die Abscheidung unterstützen.

Als Material für die Sprühelektrode des Elektrofilters kommen sehr dünne Spezialdrähte sowie sternförmig angeordnete, dünne Bleche mit am Rand sägezahnförmigen Stanzungen in Betracht (s. Abb. 93).

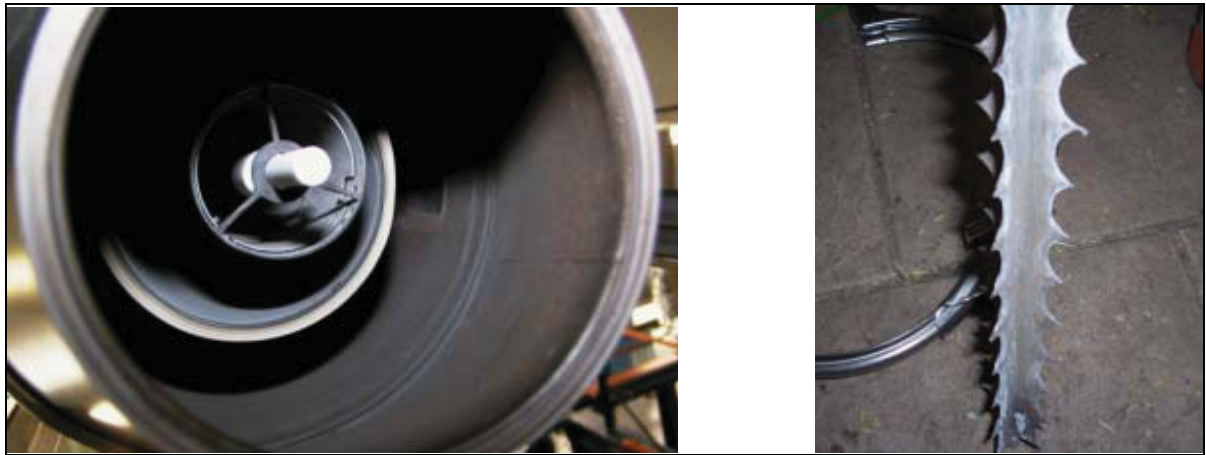


Abbildung 93: Abscheider mit Einlauf und PTFE-Formkörper zur Sprühdraht-Fixierung (links), Sprühelektrode in Form von vier sternförmig angeordneten Blechen mit einer sägezahnförmigen Stanzung (rechts) [/1/]

Die geometrische Form bzw. der Durchmesser der Sprühelektrode beeinflussen die Feldstärke im Abscheiderrohr und damit auch das Abscheideverhalten. Daher wurden Erstuntersuchungen bzw. die Inbetriebnahme des Abscheiders mit verschiedenen Sprühdrahten im Technikum des ILK durchgeführt. Für die Sprühelektroden in Drahtform ergeben sich für die verschiedenen verwendeten Elektrodenmaterialien bzw. –durchmesser die Strom-Spannungskennlinien [/1/]. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wird als Sprühelektrode der Spezialdraht aus Wolfram / Rhenium (Wo / Rhe) mit einem Durchmesser von 78 μm eingesetzt. Er wird durch ein Gewicht aus Polytetrafluorethylen (PTFE) im Zentrum der Niederschlagselektrode (NE) gespannt (s. Abb. 93). Die Befestigung und Hochspannungsversorgung erfolgt über Spezialbuchsen im kalten Bereich. Weitere grundlegende Untersuchungen wurden zum Druckverlust sowie Abscheideverhalten durchgeführt. Demnach hat der Abscheider vor allem durch die mehrfachen Umlenkungen einen Druckverlust von 420 Pa bei einem Rauchgasvolumenstrom von 80 m^3/h .

Für die Abscheidung von (geladenen) Partikeln durch ein elektrostatisches Feld sind zwei unterschiedliche Auflademechanismen verantwortlich. Im Größenbereich unterhalb von 0,2 μm die Diffusionsaufladung und oberhalb von 1 μm die Feldaufladung. Daraus resultiert innerhalb dieser Grenzen ein Minimum der Wanderungsgeschwindigkeit senkrecht zur Strömungsrichtung und damit auch des Fraktionsabscheidegrades, welche für den eingesetzten Abscheider dargestellt ist. Für die Regenerierung wurde als Lösung vorgesehen, dass die Niederschlagselektrode mit Druckluft abgereinigt wird. Dabei werden gleichzeitig der Sprühdraht und die Niederschlagselektrode gespült. Um eine leichte Reinigung der Niederschlagselektrode während des Betriebs zu ermöglichen, wurde eine Beschichtung ausgewählt, welche zum einen leitend ist und zum anderen eine sehr glatte Oberfläche bietet. Eine Lösung wurde in einem Beschichtungssystem der Firma Rhenotherm gefunden. Die Apparateile wurden daraufhin mit der Oberflächenbeschichtung EC 004 ausgerüstet, welches sich erstklassig beim Einsatz bewährt hat.

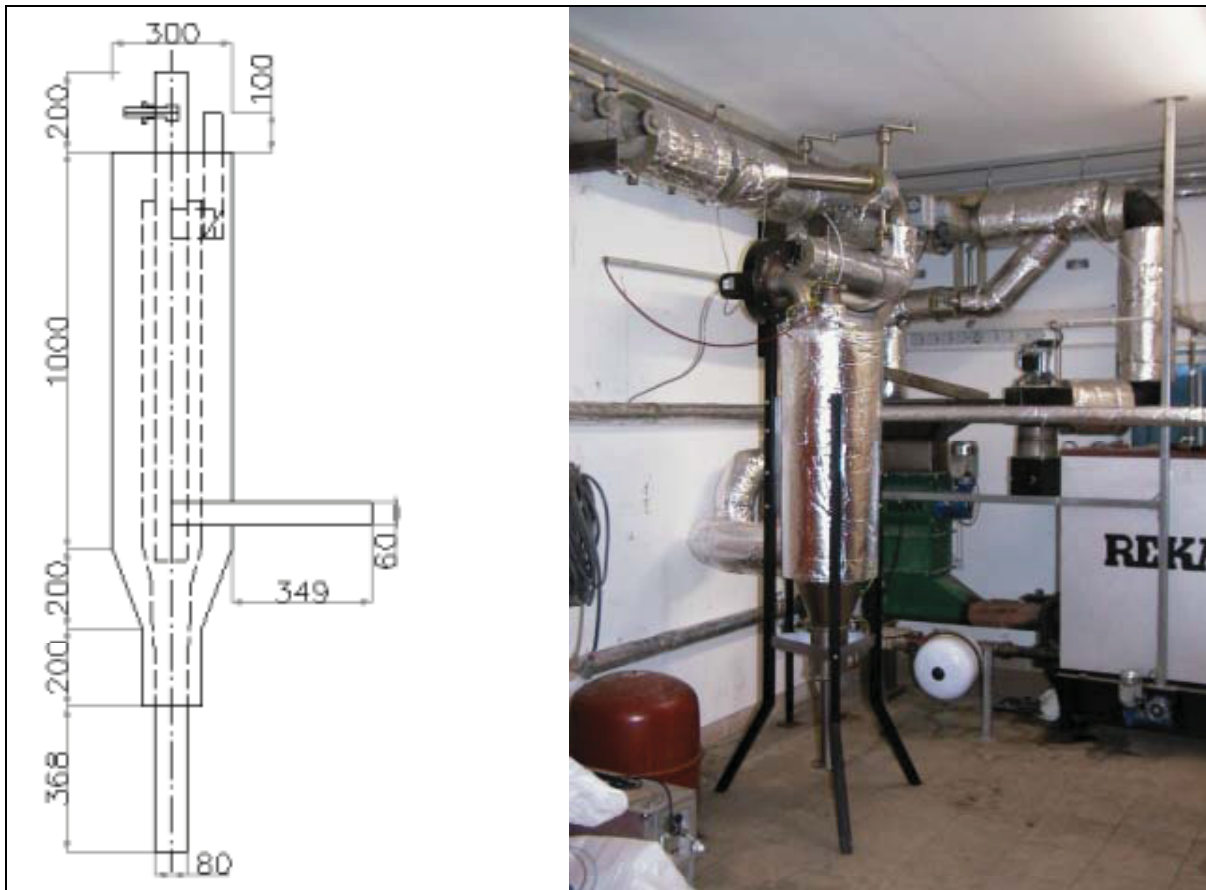


Abbildung 94: Realisiertes Abscheidersystem in Zottelstedt (am Reka-HKRST 30) [/1/]

Abbildung 94 zeigt die für die Praxisanlage in Zottelstedt (am Reka-HKRST 30) realisierte Abscheidervariante. Die Einbindung der Filtertechnik in das Abgassystem erfolgt durch zwei Rauchgasweichen. Ihre Klappen werden motorisch betrieben. Die für die Ansteuerung der Klappen sowie des Lüfters und des Hochspannungsmoduls notwendige MSR-Technik wurde in einem separaten Schaltschrank integriert. Die Abscheidersteuerung erhält zwei Temperatursignale T1 sowie T2 von zwei abgesetzten Temperatursensoren (PT 100) am Eingang bzw. Ausgang der Rauchgasweichen. Es werden zwei Grenztemperaturen T1_Grenz und T2_Grenz festgelegt. Überschreitet T1_Grenz eine Temperatur von 120°C, werden die Rauchgasweichen geschaltet, so dass das Rauchgas über den Abscheider strömt. Wird am Ausgang des Abscheiders (Rauchgasweiche 2) die Temperatur T2_Grenz = 100°C erreicht, schaltet die Hochspannung zu. Damit wird effektiv verhindert, dass für den Abscheiderbetrieb eine entsprechend hohe Betriebstemperatur des Heizkessels anliegt und es zu Kondensationsproblemen im Abscheider kommt.

Im Vergleich zu den in den Vorversuchen ermittelten mittleren Staubkonzentrationen von $250 \text{ mg/Nm}^3 \pm 50$ bei 13 % Vol. O_2 stellten sich im Rahmen der weiteren Messungen weitaus größere Rohgasbelastungen dar. Ihr Niveau für Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) lag bei ca. 1000 mg/Nm^3 bei 13 % Vol. O_2 . Diese enorme Emissionskonzentration kann auf eine hohe Feuerraumtemperatur zurückgeführt werden. Bedingt durch die Gehalte der Elemente K, Cl und S im Brennstoff, die während des Verbrennungsvorganges freigesetzt werden, entstehen die Verbindungen KCl und K_2SO_4 als Hauptbestandteile der staubförmigen Emissionen [49/]. Bei einer entsprechend hohen Temperatur im Glutbettbereich wird die Verdampfung von Kalium begünstigt. Es bildet zusammen mit den Gasen HCl, SO_3 bzw. SO_2 die genannten Verbindungen, welche dann als Partikel emittiert werden. Ein Indiz für eine hohe Feuerraumtemperatur in Verbindung mit vergleichsweise hohen Gehalten der genannten drei Elemente im Brennstoff ist die starke Verschlackung der Pelletbrennstoffe die bei den Verbrennungsversuchen beobachtet werden konnte. Die Abscheideversuche wurden im stationären Heizkesselbetrieb unter Volllastbedingungen vorgenommen. Es wurde die Funktion des Abscheiders im Kesselbetrieb untersucht und verschiedene Einstellungen der Hochspannung zur Optimierung vorgenommen. Im Versuchsbetrieb mit Getreidekorn wurde ein mittlerer Reingasstaubgehalt von $86,4 \text{ mg/Nm}^3$ bei 13 % Vol. O_2 erzielt. Gegenüber einem Rohgasstaubgehalt von 199 mg/Nm^3 bei 13 % Vol. O_2 errechnet sich ein Abscheidegrad von $\eta = 57 \%$. Dabei begünstigte ein relativ hoher Wassergehalt im Abgas zwar die Abscheidung in der Vorabscheidestufe, verursachte allerdings in der Elektroabscheidestufe Durchschläge und beeinträchtigte die Abscheiderfunktion. In Verbindung mit dem erhöhten Wassergehalt im Abgas wirkt sich die durch verlängerte Abgaswege und geringe Volumenströme bedingte Abkühlung der Rauchgase ungünstig für den Abscheiderbetrieb aus. Es wurde versucht, dem durch möglichst kurze Wegstrecken und Wärmeisolation entgegenzuwirken. Dies ist jedoch durch räumliche Gegebenheiten begrenzt und ein Temperaturverlust im Abgas unvermeidbar.

Bei den Versuchen zum Abscheideverhalten mit dem Brennstoff Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) trat eine Überlastung des Abscheider-Prototypen in Folge der extrem hohen Staubbeladung des Rohgases gegenüber der Abscheiderauslegung ein. Demnach erfolgte die Beaufschlagung des Abscheiders mit einer etwa 5-fach höheren Rohgaskonzentration als geplant. Abbildung 95 zeigt abgeschiedenen Staub im Bereich der Elektrodeneinführung und die Dicke der Staubschicht auf der Niederschlagselektrode.



Abbildung 95: Staubablagerungen im Bereich der Elektrodeneinführung (links) und der Niederschlagselektrode (rechts) [/1/]

Trotz der sehr schwierigen Einsatzbedingungen konnte mit der günstigsten Konfiguration ein Abscheidegrad von bis zu 74 % erzielt werden. Neben der Sprühelektrodenform 1 und dem Spezialdraht aus Wo / Rhe wurde für die Versuche eine weitere starre Sprühelektrodenform 2 erprobt (s. Abb. 93, rechts). Bei ihr entfällt am Elektrodenende das Spanngewicht und Durchschläge auf Grund leitender Schichten (Abgasfeuchte) am Spanngewicht werden vermieden.

Tabelle 28: Übersicht Mess- und Berechnungsergebnisse Abscheiderversuche (15 min Mittelwert) [/1/]

Nr. M	Spezifikationen	Rohgas	Reingas	abgeschiedene Staubmasse
		mg/Nm ³ 13 Vol. % O ₂		
4.1	Rohgas	928		
4.2	Reingas, 8 kV ²⁾		694	234
4.3	Teilstrom, 12 kV ²⁾		667	261
4.5	Rohgas	994		
4.4	Teilstrom, 8 kV ²⁾		765	229
4.6	Reingas, Teilstrom 18 kV ¹⁾		452	542
4.7	Reingas, Teilstrom 18 kV ¹⁾		606	388
4.8	Reingas, Teilstrom 18 kV ¹⁾		447	547
4.9	Reingas, Teilstrom 20 kV ¹⁾		257	737

¹⁾ Elektrodenform 1: Sprühdraht, 78 µm Wo / Rhe; ²⁾ Elektrodenform 2: Sägezahn – Profil [/1/]

Jedoch können auf Grund ihrer geometrischen Form keine so hohen Spannungspotentiale aufgebaut werden wie bei Elektrodenform 1. Damit war die erreichbare Abscheideleistung für den Brennstoff Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) auf 28 % begrenzt. Wird für die Abscheiderkonfiguration (s. Nr. M 4.9, Tab. 28) von einer Obergrenze des Abscheidegrades $\eta_{\max} = 70 \%$ ausgegangen, so ist bei Winterweizenkörner mit einem mittleren Rohgas-Staubgehalt von 199 mg/Nm³ bei 13 Vol. % O₂ ein Reingasgehalt von 60 mg/Nm³ bei 13 Vol. % O₂ einzuhalten. Durch die im Abscheidebetrieb durchgeführten kontinuierlichen und

diskontinuierlichen Messungen kann davon ausgegangen werden, dass der erprobte Abscheider keinen negativen Einfluss auf die Verbrennungsqualität besitzt.

Fazit

Durch die in den FuE Projekten durchgeführten Untersuchungen stellte sich wiederholt dar, dass mehrere (Standort) Faktoren die Emissionshöhe der Rauchgasparameter bedingen:

- Brennstoff
- Kesseltechnik
- Aufbereitungsform
- Wartungs- und Reinigungszustand der Kesselanlage.

Das System Heizanlage-Brennstoff-Betreiber ist somit in der Praxis immer in seiner Gesamtheit zu betrachten. Pauschale Aussagen über das Staubaufkommen sind nicht möglich. Des Weiteren muss die Betriebsweise der Heizanlage kritisch beurteilt werden. Häufige An- und Abfahrvorgänge führen zu starken Anstiegen der Emissionen und begünstigen die Korrosion.

Die Abscheiderkonstruktion in Dobia am HKRST 60 als Kombination aus Vorabscheider und Schütttschichtfilter stellte sich als wirksam dar. Agglomerationseffekte der Staubpartikel konnten aufgezeigt werden. Die erreichbare Reingaskonzentration mit einem Abscheider dieser Bauart ist jedoch begrenzt. Höhere emissionsseitige Anforderungen (2. Stufe der Novelle der 1. BImSchV) können damit nicht eingehalten werden. Als Weiterentwicklung erscheint die Einbringung einer Abscheidestufe zur elektrostatischen Abscheidung als sinnvoll. Durch die Verwendung von Brennstoffen mit geringem Wassergehalt und einem schnellem Ansteigen der Rauchgastemperatur beim Anfahren des Heizkessels wären bei Anwendung dieser Abscheidetechnik keine zusätzlichen, kondensationsbedingten Maßnahmen zu ergreifen.

Für die HKRST 30 Anlage in Zottelstedt kann festgestellt werden, dass der Grenzwert nach 1. BImSchV für Gesamtstaub mit den Brennstoffen Wintergersten-, Winterweizenkörner (WG und WW RB) und Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) eingehalten wird. Zur Erfüllung der höheren Anforderungen ist der entwickelte Abscheider jedoch zu klein dimensioniert. Allgemein sind für hohe Staubfrachten im Rohgas, wie sie z.B. bei Strohpelletfeuerungen auftreten, relativ große Elektro-Abscheider notwendig, um entsprechend geringe Rauchgasgeschwindigkeiten und damit hohe Abscheidegrade zu gewährleisten. Dies bedeutet einen hohen Platzbedarf im Aufstellraum und einen höheren Wärmeverlust durch die vergrößerte Oberfläche, wodurch die Betriebstemperatur spät erreicht wird. Dies führt unweigerlich zu Kondensationsproblemen beim Anfahrprozess vor allem für Brennstoffe mit hohem Wasseranteil. Daher erfolgte die Einbindung derartiger Abscheider mit temperaturgesteuerten Rauchgasweichen. Um den zusätzlichen Widerstand durch den

Abscheider im Rauchgasweg auszugleichen, werden Stützgebläse verwendet. Die im Projekt umgesetzte Auslegung gestaltete sich schwierig und bedarf zusammen mit dem Abscheider einer Überarbeitung. Für alle untersuchten Brennstoffe und Anlagen konnten typische Partikelgrößenverteilungen in den Staubemissionen ermittelt werden. Sie weisen Biomassefeuerungen als Feinstaubquelle aus - mit einem Anteil der Partikelgröße PM 2,5 von oftmals deutlich über 90 %. Es konnte gezeigt werden, dass durch Agglomerationseffekte innerhalb des Abscheiders eine deutliche Verschiebung der Fraktionsanteile zu > PM 2,5 und > PM 10 möglich ist und somit der Anteil der Fraktion PM 2,5 auf unter 80 % fällt. Entsprechende gesundheitliche Risiken [48/] können somit gemindert werden.

Tabelle 29: Vergleich der entwickelten und geprüften Abscheidetechnik [71/]

Einsatzort / Anlage	Reka HKRST 60	Reka HKRST 30
Brennstoffe	Stroh-Häcksel	Pellet / Getreide
Abscheiderart	Fliehkraft / Schütttschicht	Elektrostatischer Rohrabscheider
Rohgaswerte Korn Stroh	100 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³ 350 ... 1500 mg/Nm ³
Reingaswerte Korn Stroh	60 mg/Nm ³	100 mg/Nm ³ 500 mg/Nm ³
Kostenschätzung	3000,- EUR	4500,- EUR
Eignung	Einhaltung der 1. BImSchV	überlastet / zu klein dimensioniert

Die Ergebnisse des FuE-Anteils zur Abscheidetechnik lassen sich ergänzend zu Tabelle 29 wie folgt zusammenfassen.

- Es bestehen große Unterschiede von Prüfstands- und Praxisergebnissen.
- Die Variation der Halmgutbrennstoffe bedingt erhebliche Unterschiede im Emissionsniveau.
- Ohne Sekundärmaßnahmen können Staub-Grenzwerte nur unter definierten Bedingungen bei ausgewählten Brennstoffen eingehalten werden.
- Es wurden im Vergleich zur Verbrennung von Getreide insbesondere sehr hohe Staubemissionen bei Strohpellets festgestellt.
- Die Verbrennungsbedingungen, sowie die Pellet-Geometrie und -zusammensetzung sind ausschlaggebend für die Emissionen.
- Die besten Ergebnisse wurden bei der Verbrennung von Stroh-Häckseln erzielt.
- Für normative Vorgaben ist ein Bezugs-Brennstoff erforderlich.
- Der Wartungszustand des Kessels bedingt in hohem Maße das Emissionsniveau. Eine regelmäßige Reinigung und Wartung ist erforderlich.

3.2.2.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Schutzrechte

Auf Grundlage der Novellierung der 1. BImSchV und dem Stand der Technik der Feuerungsanlagen wird beim Einsatz von Halmgutbrennstoffen der Einsatz von geeigneten Abscheidetechnologien besonders bei konventionellen Feuerungsanlagen notwendig. Da für derartige Heizanlagen allein für den Heizkessel (30 kW) Kosten von ca. 10.000 € anzusetzen sind, muss davon ausgegangen werden, dass ein Abscheider für eine Anlage dieser Leistung etwa 30 % des Kesselpreises nicht übersteigen darf. Damit werden 3.000 € als oberste Preisgrenze für Abscheider in diesem Leistungsbereich erreicht (entsprechende Kosten für die bauseitige Einbindung der Abscheider sowie Installationsmaßnahmen nicht berücksichtigt). Mit der in diesem FuE-Projekt eingesetzten Zusatzausrüstung der Abscheidetechnik (Rauchgasweichen, Steuerung Rauchgasweichen, Stützventilator) kann diese Preisgrenze nicht eingehalten werden. Dazu ist weitere Entwicklungsarbeit notwendig um an einer Vereinfachung der Abscheidereinbindung in Verbindung mit der verfahrenstechnischen Verkopplung Heizkesselbetrieb-Abscheiderbetrieb zu arbeiten. Während der Projektphase erschwerend kamen die hohen Legierungszuschläge für Edelstahl hinzu. Sie verursachen ein starkes Ansteigen der Material- bzw. Herstellungskosten und unterliegen spürbaren Schwankungen.

Schutzrechtsfähige Lösungen für die Abscheidertypen bestehen derzeit noch nicht und könnten sich erst durch eine Weiterentwicklung bzw. Optimierung ergeben.

3.2.2.3 Praxistests weiterer Staubabscheidetechnologien (DEULA, [9/])

Im Rahmen des Projektes der DEULA fanden ergänzend zu den Untersuchungen der Anlagentechnologie der Firma Reka (HKRST 100) Messungen an zwei unterschiedlichen Abscheidetechnologien statt. Zunächst wurde der, in Vorversuchen des dänischen Prüfinstitutes mit guten Abscheidewirkungen bestätigte, Elektrofilter der Firma Reka eingesetzt (vgl. Abb. 7). Dieser wurde mit unterschiedlichen Brennstoffen hauptsächlich in Volllast untersucht, konnte aber auch nach Prüfung und Optimierung keine durchgängige und sichere Reduzierung der Stäube gewährleisten. Umbauten und Änderungen im Hochspannungsbereich brachten keine Verbesserungen. Vorschläge zur Neukonstruktion des Filters wurden als zu risikobehaftet nicht aufgegriffen. In Abstimmung mit den Projektkoordinatoren erfolgte daraufhin die Erprobung einer bereits erfolgreich in der Praxis getesteten Abscheidetechnik der Firma Oskar Winkel aus Amberg (vgl. Abb. 8). Dabei handelt es sich um einen Metallgewebefilter mit drei Filterpatronen. Die Ergebnisse der Messungen an diesem Prototyp ergaben Staubreduzierungen auf 24 bis 35 % der Rohgasgehalte. Die im Projekt eingesetzte Ausführung war allerdings noch nicht serienreif und muss weiter optimiert werden um einen Dauerbetrieb und eine sichere Staubreduktion zu gewährleisten.

3.2.3 Stickoxidemissionen (NO_x)

Die Stickoxidbildung bei der Verbrennung kann grundsätzlich auf drei verschiedenen Reaktionswegen erfolgen:

- NO_x-Bildung aus Brennstoffstickstoff
- Thermische NO_x-Bildung
- Prompte NO_x-Bildung

Die NO_x-Emissionen² von Kleinf Feuerungsanlagen werden aufgrund der vorliegenden Temperaturbereiche in den Feuerräumen fast ausschließlich durch den Stickstoffgehalt der Brennstoffe beeinflusst [vgl. /2/, /3/, /23/, /28/, /29/, /32/]. Dies verdeutlichen besonders gut die Ergebnisse der mit Messstellen entsprechend des § 26 des BImSchG bzw. Landesmessstellen gemessenen Langzeitversuche am Agro 40, dem AWK SI 45 sowie dem RHK-AK 60, welche bei nahezu gleichen Ausbrandverhältnissen (CO-Niveaus, vgl. Kapitel 3.2.1) die klare Brennstoffstickstoffabhängigkeit belegen (s. Tab. 30, Abb. 96 bis 104).

Tabelle 30: Vergleich der NO_x-Konzentrationen in Abhängigkeit des Brennstoffstickstoffgehaltes

Parameter	Anlage	WWSP	n =	WRSP	n =	WG	n =	WW	n =
N		0,08	8	0,10	2	0,13	3	0,17	2
NO _x	Agro 40	269	23	387	6	652	156	706	171
	AWK SI 45 ¹⁾					598	73	657	69
	RHK-AK 60	265	66	352	6	249	26	372	57

¹⁾ am AWK SI 45 wurden nur Getreidekörner untersucht
Angaben N [% d. TM]; NO_x [mg/Nm³; 13 % Vol. O₂]

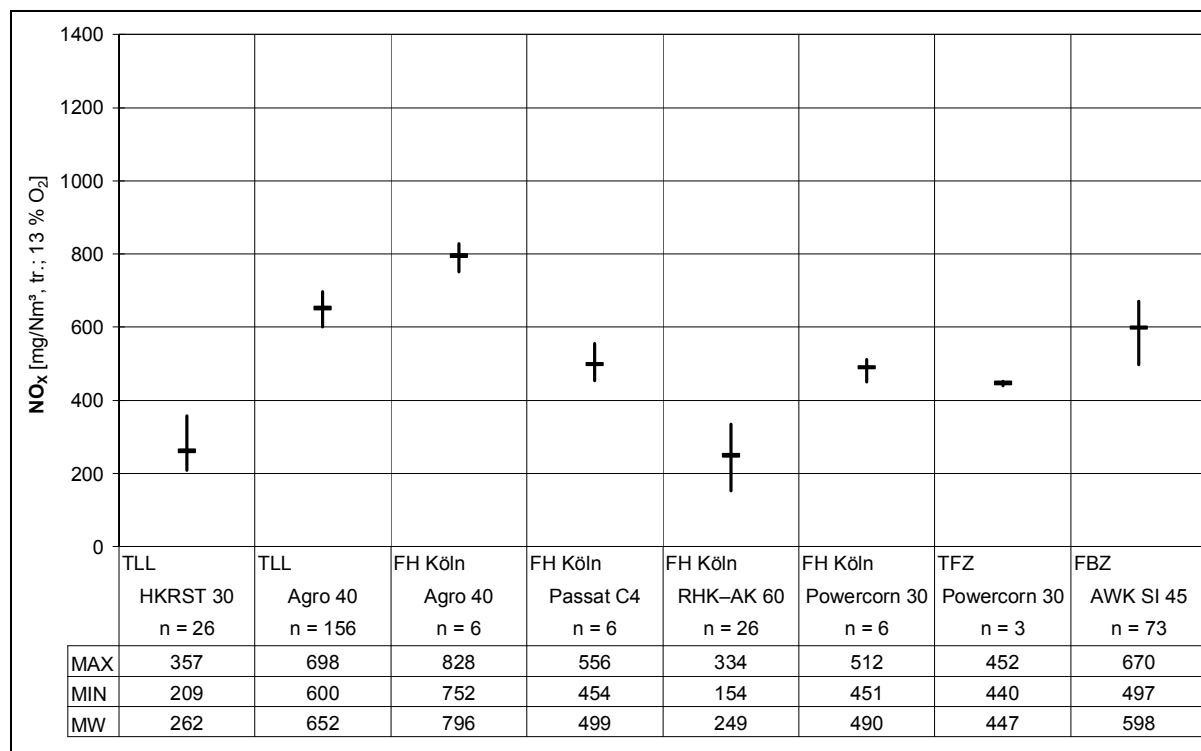


Abbildung 96: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

² Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben im folgenden mit NO_x als Stickstoffdioxid

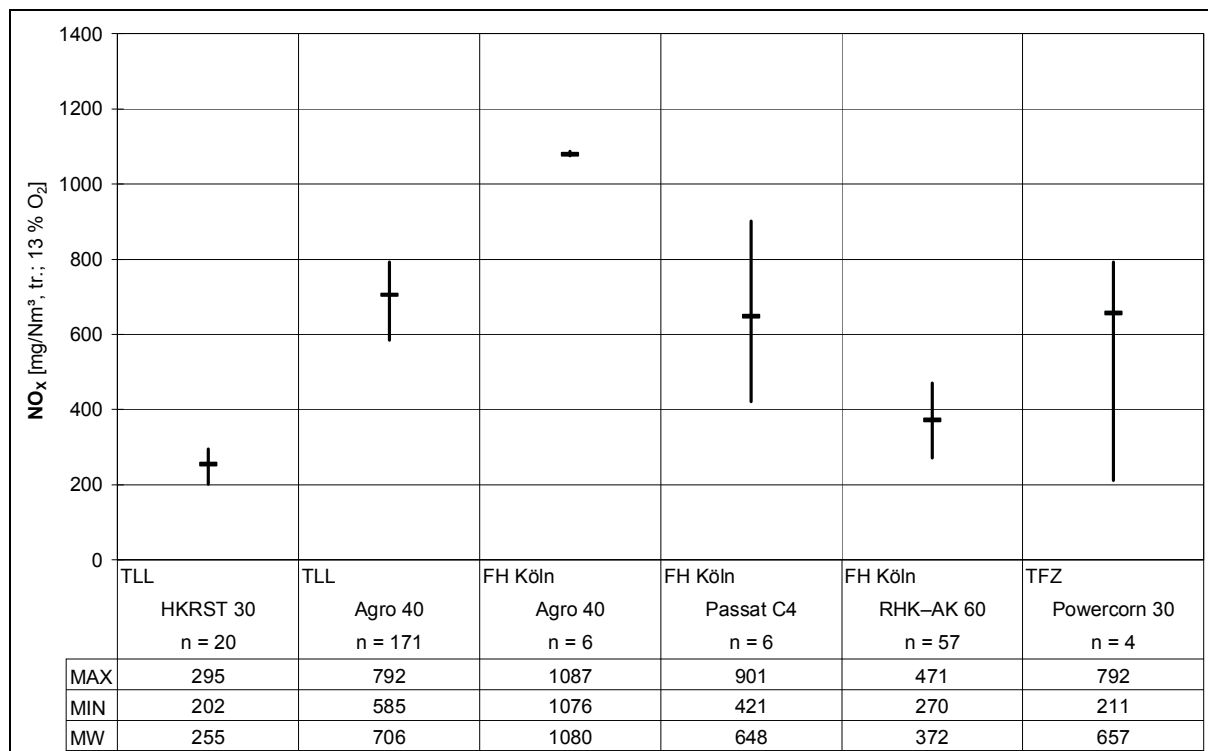


Abbildung 97: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

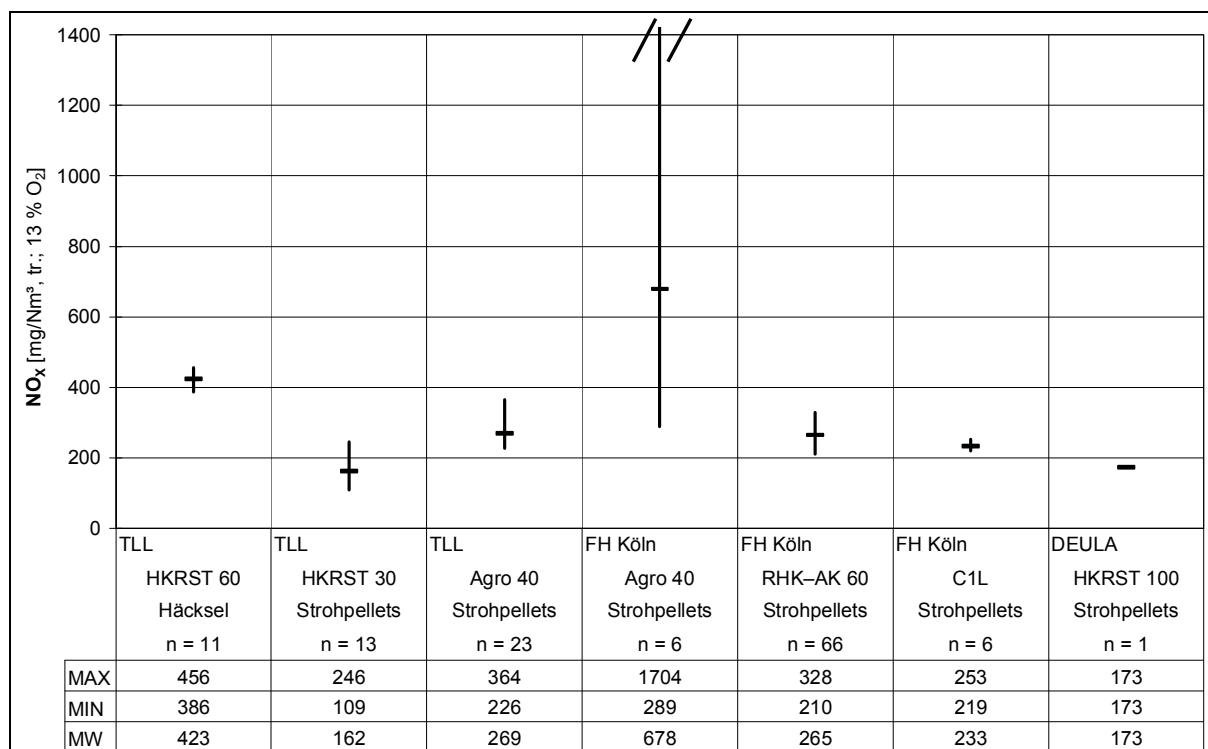
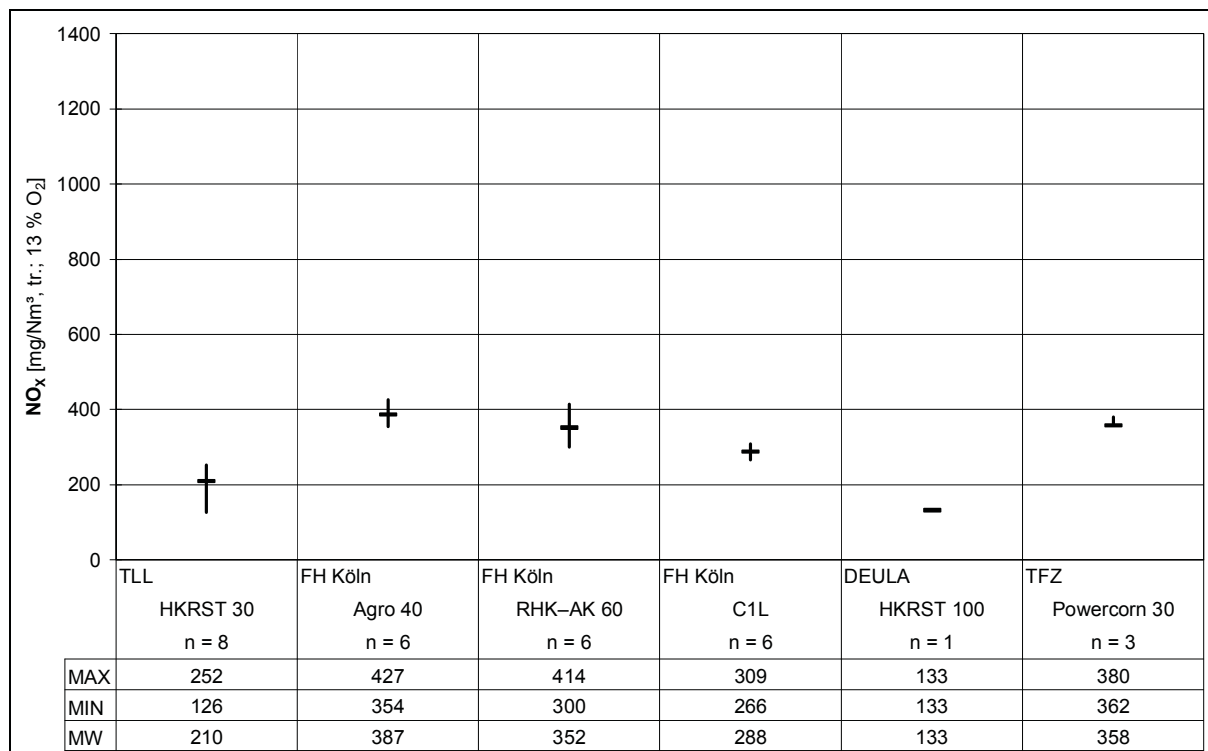


Abbildung 98: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen



Abbildungung 99: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Neben der Abhängigkeit vom Brennstoffstickstoffgehalt wird die Entstehung von NO_x durch den Luftüberschuss in den jeweiligen Verbrennungsphasen mit bestimmt. Daher ist es möglich, dass durch erhöhten Luftüberschuss bei gleichen Anlagentechnologien bei Verwendung des gleichen Brennstoffausgangsmaterials (z.B. Weizenstroh) in Form von Häckseln in der Anlage HKRST 60 höhere Emissionskonzentrationen von NO_x vorliegen als in der Anlage HKRST 30 in Form von Pellets (s. Abb. 98).

Die Ergebnisse der drei besten Technologien (s. Abb. 100) aus den mit Referenzbrennstoffen untersuchten Anlagen überschreiten dabei teilweise bei ausgewählten Brennstoffen, insbesondere für die stickstoffhaltigeren Getreidekörnerchargen, den in der novellierten 1. BImSchV vorgesehenen Grenzwert für Prüfstandsuntersuchungen (vorgesehener NO_x -Grenzwert: $0,6 \text{ g/Nm}^3$ bei 13 % Vol. O_2). Dabei ist anzumerken, dass sämtliche Untersuchungen mit der Maßgabe des bestmöglichen Ausbrandes erfolgten, um höchstmögliche Wirkungsgrade bzw. geringste CO-Konzentrationen zu verursachen. Aufgrund der negativen Korrelation von NO_x - und CO-Konzentrationen und erster Voruntersuchungen an neuartigen Anlagen (vgl. Kapitel 3.1.5) wird deutlich, dass diese Anforderungen gerade für Getreidekörner zwar ambitioniert, aber durchaus erreichbar sind. In Bezug auf den Einsatz von Stroh wurde bis auf eine Ausnahme der vorgesehene Grenzwert für Typenprüfungen in den gemessenen Praxisanlagen unterschritten.

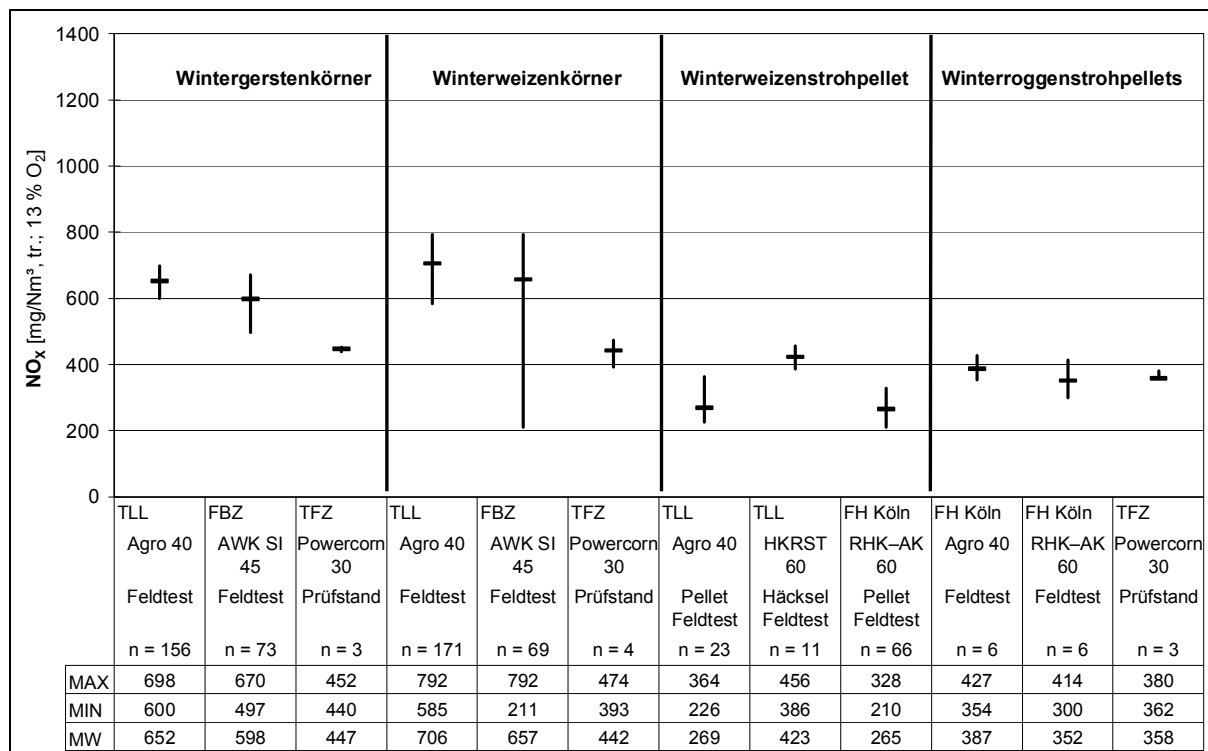


Abbildung 100: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die in den Abbildungen 101 bis 104 dargestellten Ergebnisse zur Untersuchung der Abhängigkeit der NOx-Konzentrationen von der Laststufe zeigen einen nahezu vernachlässigbaren Einfluss.

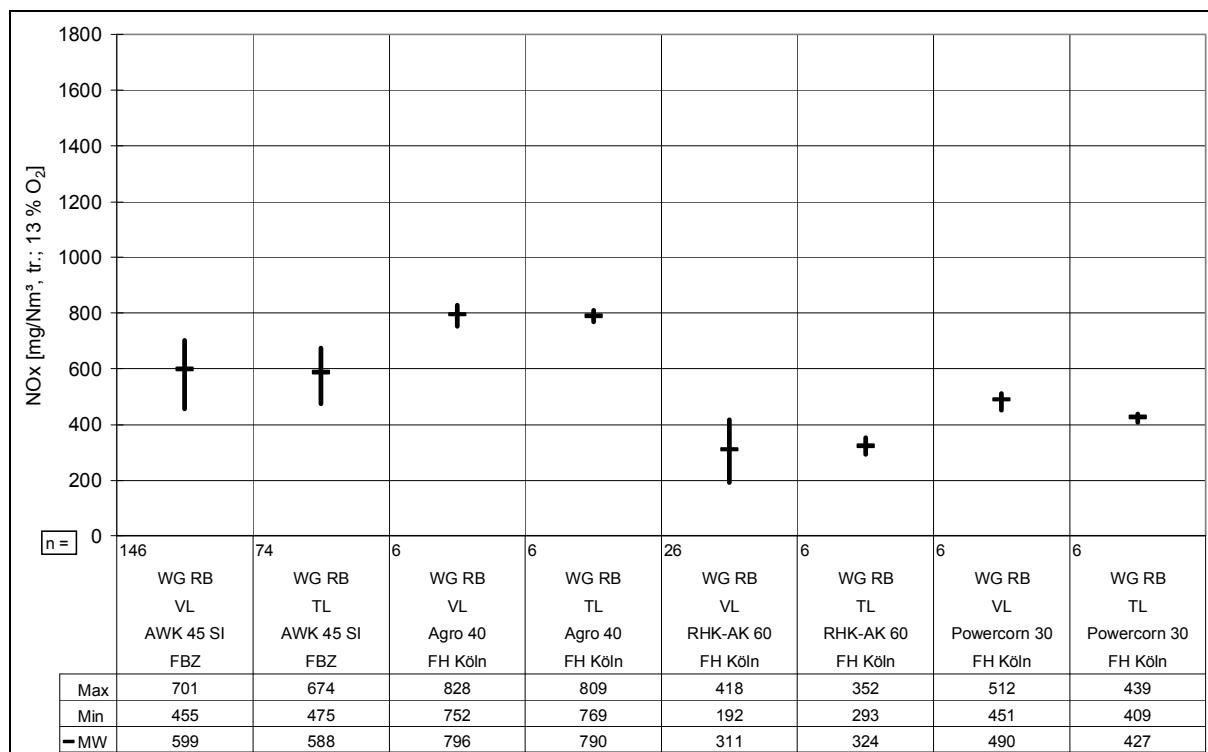


Abbildung 101: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerstenkörner (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

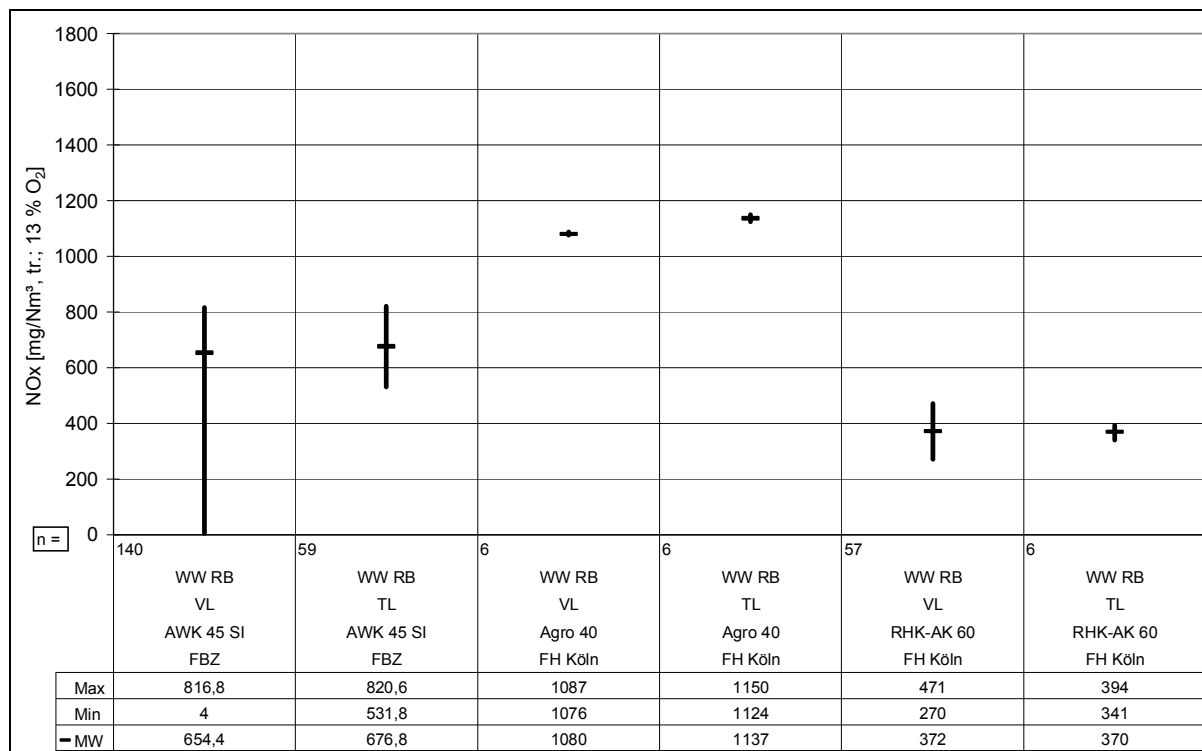


Abbildung 102: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenkörnern (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

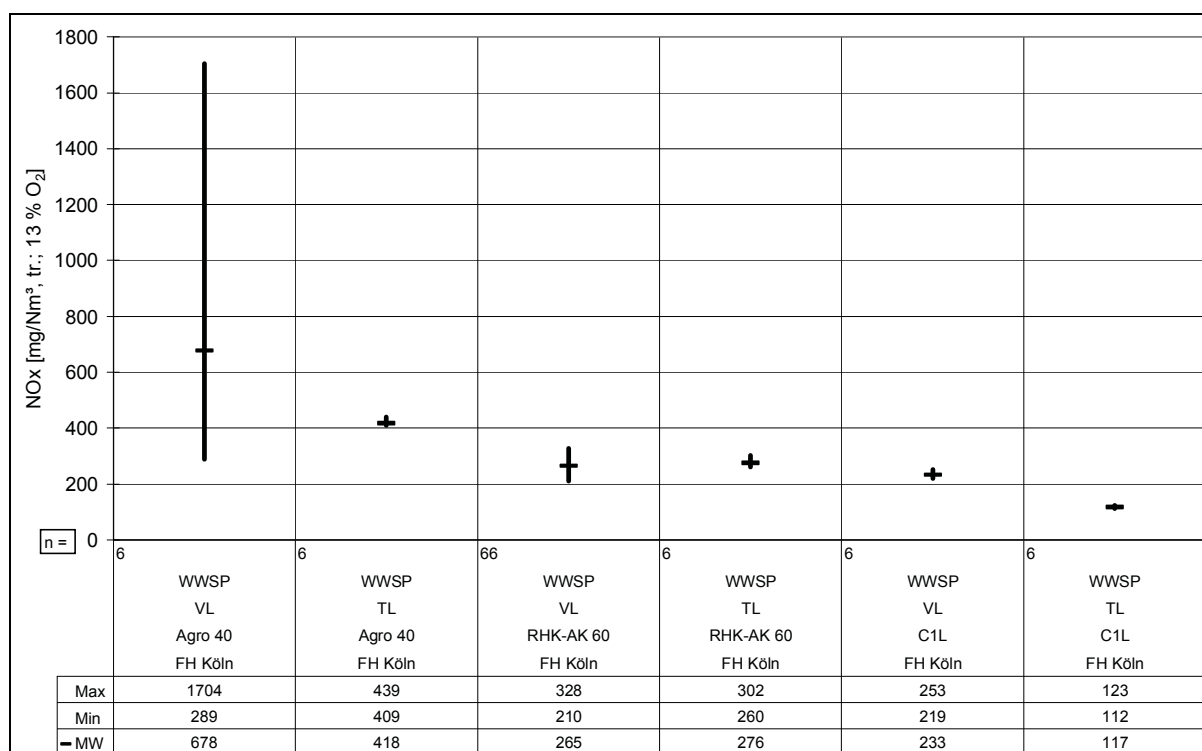


Abbildung 103: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

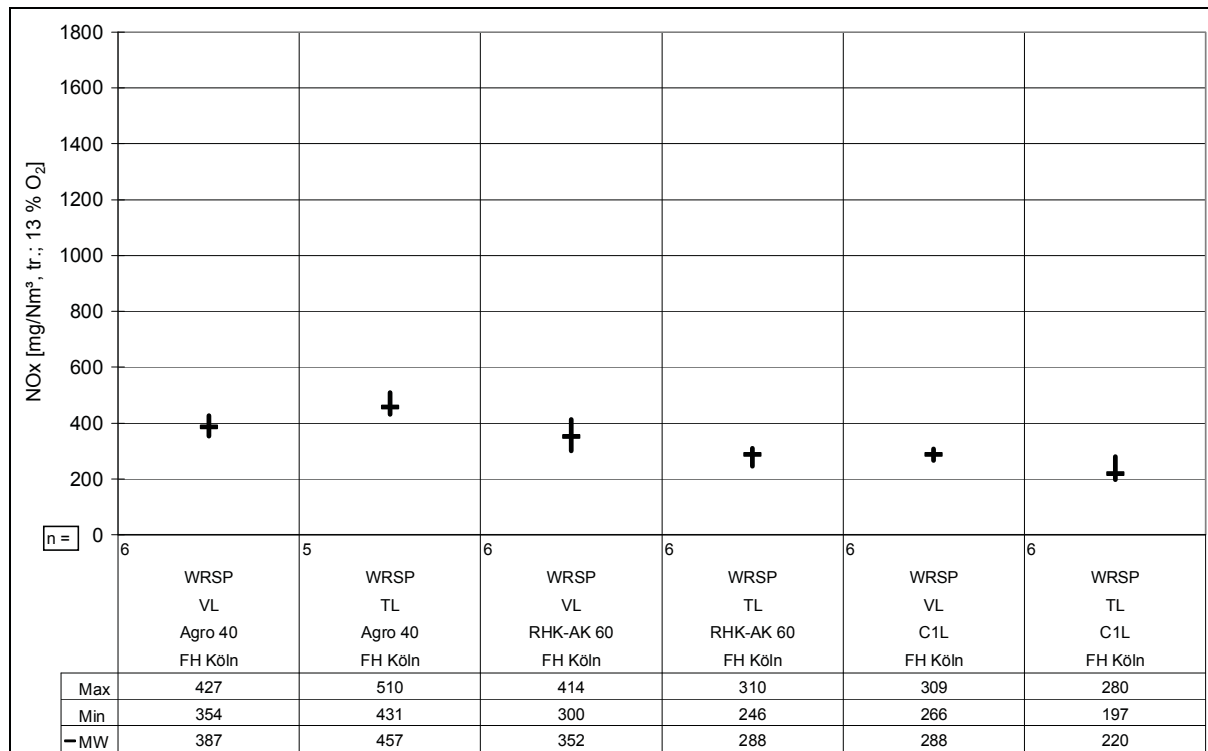


Abbildung 104: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Möglichkeiten zur Stickoxidemissionsminderung

Prinzipiell können verschiedene Maßnahmen im Bereich der Feuerung vorgenommen werden, unterschieden in Primär- und Sekundärmaßnahmen. Primärmaßnahmen greifen direkt in den Verbrennungsablauf ein, um die Bildung von Stickoxiden zu unterbinden.

Bei der Luftstufung ist der Brennraum in unterschiedliche Reaktionszonen aufgeteilt. Es erfolgt eine gestufte Zugabe von Verbrennungsluft und Brennstoff. Im brennernen Bereich entsteht eine unterstöchiometrische Reduktionszone, in der durch sich bildende Reduktionsmittel Stickstoffoxid abgebaut wird. Die Zugabe der Ausbrandluft in der darauffolgenden Zone sorgt für einen vollständigen Ausbrand [50]. Bei der Luftbegrenzung zur Unterdrückung der NOx-Bildung ist darauf zu achten, dass sich dadurch nicht zu hohe CO-Werte ergeben.

Die Abgasrückführung zielt auf die Senkung der Flammentemperatur durch die kühlende Wirkung der Abgase und somit die Vermeidung von thermischen Stickoxiden ab. Weiterhin erfolgt eine Verdünnung, die zu verminderten Sauerstoffpartialdrücken führt. Somit werden die Reaktionsbedingungen für thermische Stickoxide verschlechtert. Der apparative Aufwand für die Luftführung ist jedoch hoch und erscheint für Kleinkesselanlagen bisher unrealistisch. Darüber hinaus spielt die thermische NOx-Bildung bei Kleinf Feuerungsanlagen nur eine untergeordnete Rolle.

Sekundärmaßnahmen zur Stickstoffminderung beruhen auf der Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels, um bereits gebildete Stickoxide zu molekularem Stickstoff (N_2) reagieren zu lassen. Gebildete Stickoxide können durch selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR) oder selektive katalytische Reduktion (SCR) aus dem Abgas entfernt werden. Beim SNCR-Verfahren erfolgt eine Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff im Temperaturbereich von 850 bis 950°C in die Brennkammer. Dadurch lassen sich geeignete NOx-Abbaureaktionen mit Reduktionsgraden zwischen 60 und 70 % erreichen. Beim SCR-Verfahren werden die abgekühlten Abgase unter Zugabe von Ammoniak durch einen Katalysator geleitet, in welchem der Abbau zu molekularem Stickstoff erfolgt. Bei der Anwendung dieses Verfahrens für die Verbrennung von Biomasse besteht jedoch die Gefahr der Deaktivierung des Katalysators durch eventuell enthaltene Alkaliverbindungen. Die Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit für kleine Biomassefeuerungsanlagen konnte bislang noch nicht nachgewiesen werden.

Die Minderung der NOx-Emissionen bei den Kleinf Feuerungsanlagen war bisher vor allem wegen der umfangreichen konstruktiven Änderungen im Abgassystem der Kesselanlagen wirtschaftlich nicht darstellbar. Aktuelle Entwicklungsarbeiten zu diesem Thema werden im Kapitel 4 näher vorgestellt. Unter anderem setzt man auf die Reduzierung der Bildung von Stickoxiden, indem die Verbrennungsreaktion flammenlos abläuft (z.B. FLOX Brenner). Die technische Machbarkeit dieses Konzeptes für Biomassefeuerungen wurden vom IVD [17/, /18/] als Adaption des Agro 40 sowie in der Entwicklung eines komplett neuen Verfahrens durch die FH Bingen [12/] innerhalb der FNR-Projekte entwickelt und getestet.

3.2.4 Kombiniertes Anlagenvergleich für CO – Staub – NO_x Konzentrationen

Ein Überblick über die in Kombination der relevantesten Emissionsparameter am besten geeigneten Anlagen für die einzelnen Referenzbrennstoffe wird in den Abbildungen 105 bis 108 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Genehmigungsfähigkeit im Rahmen der gegenwärtig geltenden 1. BImSchV trotz einzelner Überschreitungen beim Einsatz bestimmter kritischer Brennstoffe (z.B. Staub / WRSP RB) gegeben ist.

Legt man die während der Projektlaufzeit erarbeiteten, deutlich höheren Anforderungen des Bundesumweltministeriums bzw. des Umweltbundesamtes zu Grunde, wird deutlich, dass diese Anforderungen besonders in Bezug auf die formulierten Anforderungen der Stufe 1 (0,10 g/Nm³ bei 13 % Vol. O₂) für Staubemissionen nur in ausgewählten Anlagen und teilweise auch nur beim Einsatz bestimmter halmgutartiger naturbelassener Biobrennstoffe realisierbar sind. Betrachtet man die Anforderungen der Stufe 2 (0,02 g/Nm³; 13 % Vol. O₂) für Staubemissionen wird deutlich, dass nur einzelne Messungen im Bereich dieser Werte lagen. Hier ist die Weiterentwicklung bzw. Anpassung der Feuerungssysteme bzw. der Einsatz von entsprechenden Sekundärmaßnahmen notwendig. Letztere befinden sich für halmgutartige Brennstoffe gegenwärtig noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Ob kurzfristig praxisreife und ökonomisch realistische Lösungen gefunden werden können, bleibt abzuwarten.

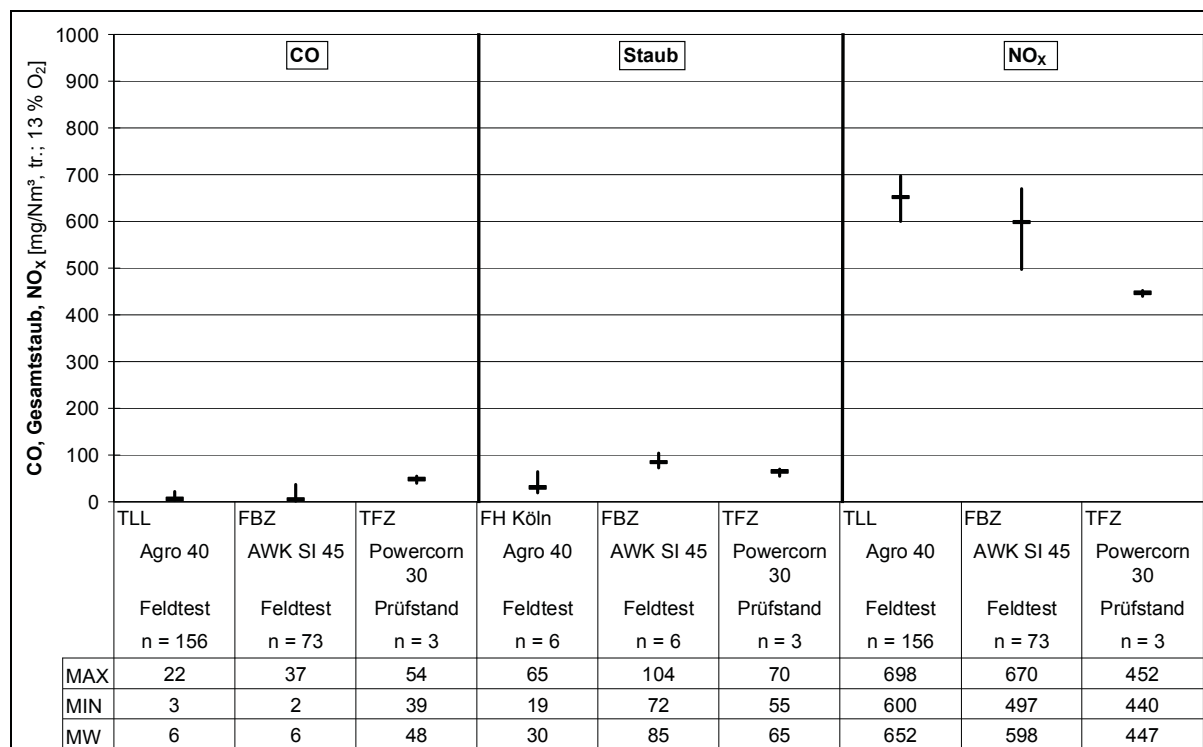


Abbildung 105: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

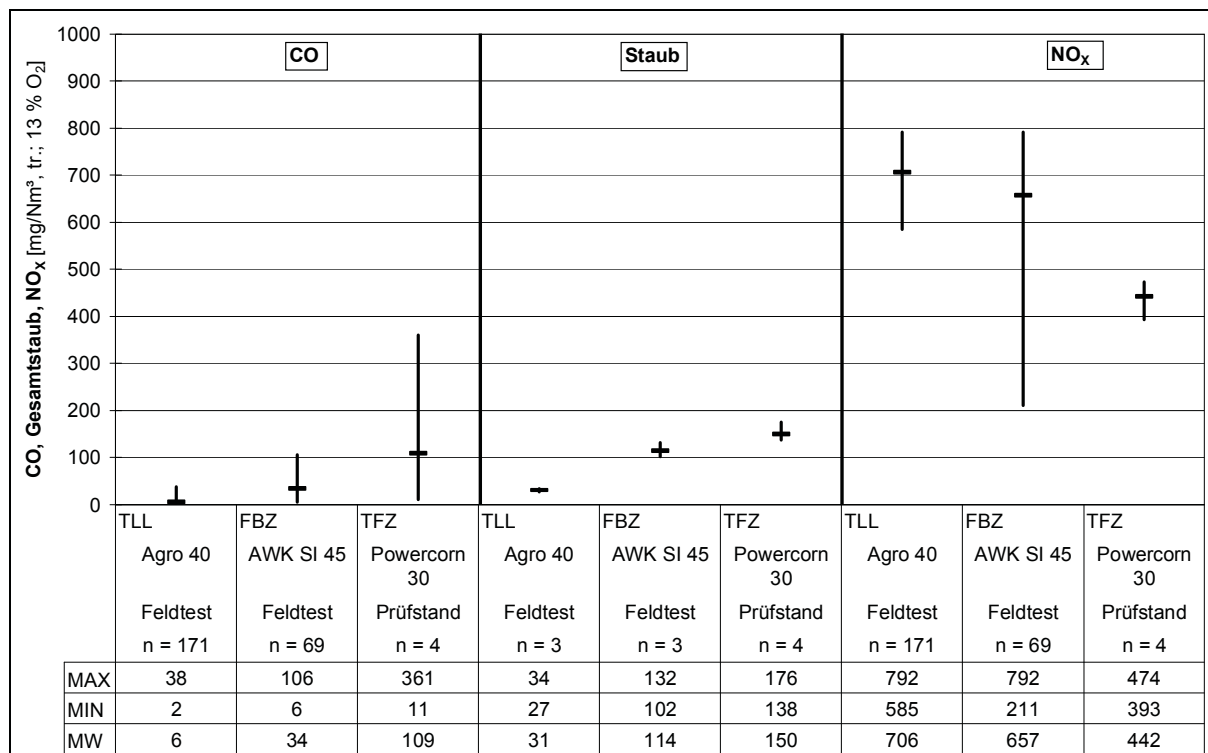


Abbildung 106: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

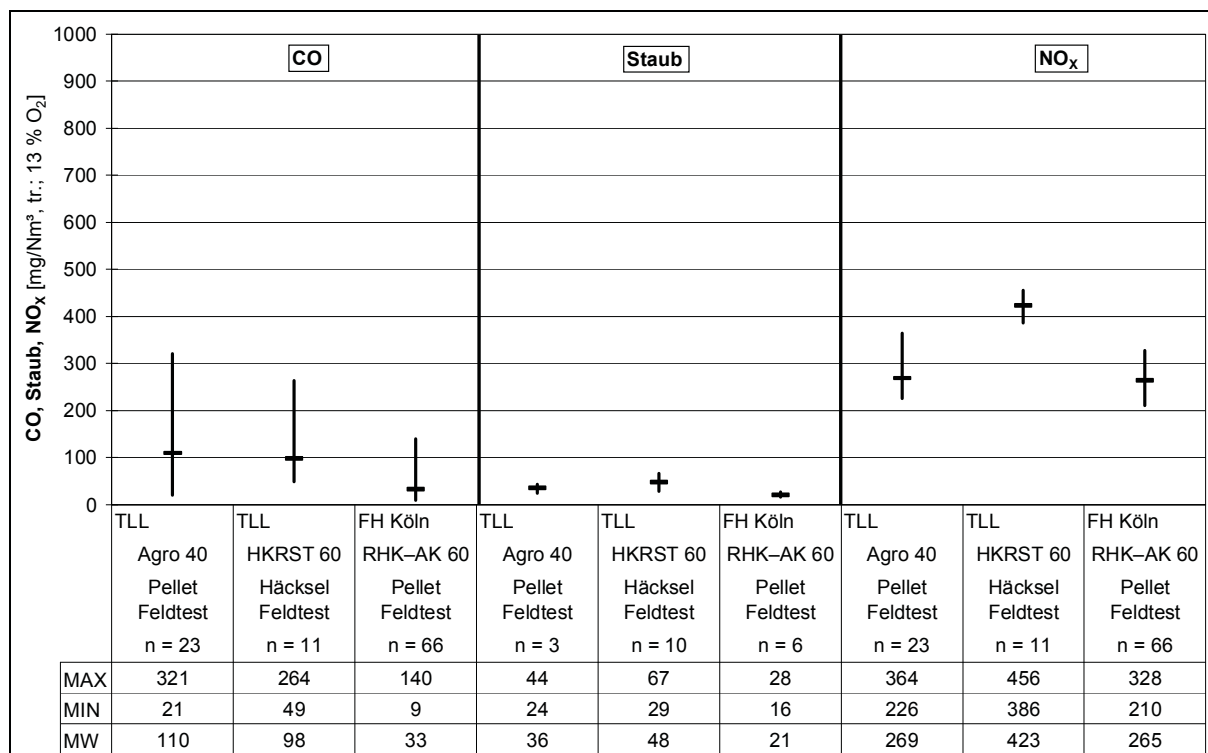


Abbildung 107: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

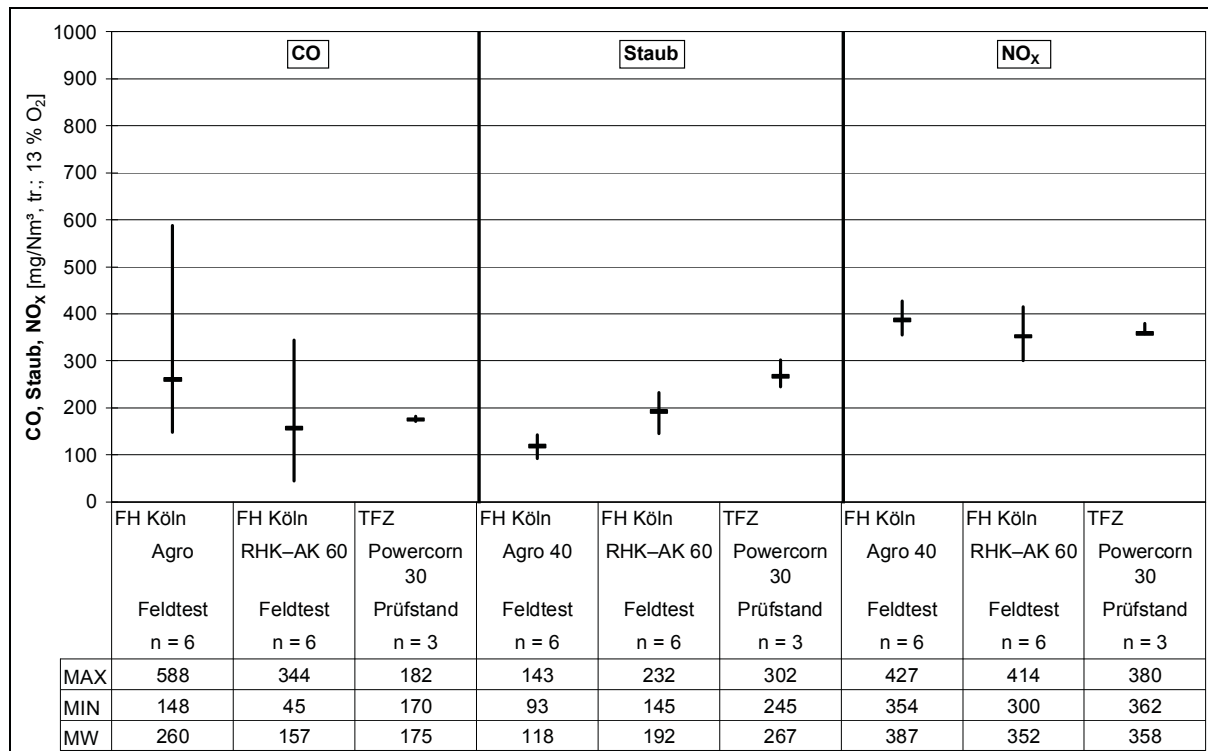


Abbildung 108: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

In Bezug auf die Einhaltung der gegenwärtig geltenden Grenzwerte der 1. BImSchV für Kohlenmonoxid (CO; 4,0 g/Nm³ bei 13 % Vol. O₂) als auch die in der Novelle der 1. BImSchV für die Zukunft formulierten sehr viel höheren Anforderungen (Stufe 1: 1 g/Nm³ bzw. Stufe 2: 0,4 g/Nm³ bei 13 % Vol. O₂) wird deutlich, dass die BVT diese bereits heute erfüllen. Hinsichtlich der Einhaltung der Prüfstandswerte für NO_x (0,6 g/Nm³) gilt es anzumerken, dass die hier dargestellten BVT durchaus in der Lage sind diese Werte zu erreichen. Ziel in den Projekten war es jedoch die Anlagen im Praxiszustand unter Optimierung des Ausbrandes zu untersuchen. Daher sind einzelne Überschreitungen von Praxiswerten gegenüber den geforderten Prüfstandsanforderungen bei ausgewählten Brennstoffen festzustellen.

3.2.5 Schwefeloxidemissionen (SO_x)

Schwefeloxide werden weder im Rahmen des Geltungsbereiches der 1. BlmSchV noch im Bereich der TA Luft im speziellen Teil für Halmgutfeuerungsanlagen, für Anlagen nach 5.4.1.3³ reglementiert. Zieht man daher vergleichsweise für eine Bewertung die Anforderungen der TA Luft des speziellen Teils für Holzfeuerungsanlagen für Anlagen nach 5.4.1.2.1⁴ heran, kann beim Einsatz von naturbelassenen Brennstoffen mit Schwefelgehalten bis etwa 0,2 % in der TM von einer sicheren Einhaltung selbst dieser mit 0,35 g/Nm³ (11 % Vol. O₂) strengsten Emissionsgrenzwerte ausgegangen werden [2/, /23/]. Bei sonstigen Feuerungen liegt der Grenzwert der TA Luft für sonstige Brennstoffe bei 1,0 g/Nm³ (11 % Vol. O₂). Wie im Kapitel 2.3.1.2 beschrieben, werden diese Brennstoffschwefelgehalte von keinem der eingesetzten Referenzbrennstoffe überschritten.

Es wird deutlich, dass beim Einsatz der Referenzbrennstoffe in der Vorschubrostfeuerung HKRST 30, Emissionswerte von maximal 450 mg/Nm³ erreicht werden (s. Abb. 09, vgl. Kapitel 3.1.1).

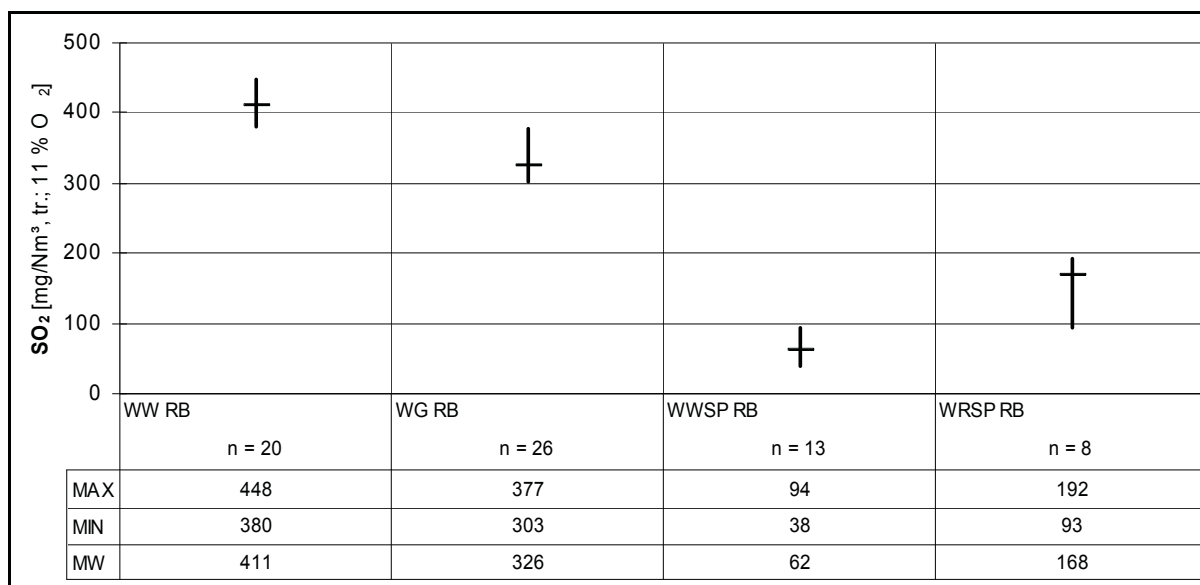


Abbildung 109: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Vergleicht man die Brennstoffe untereinander, so kann festgestellt werden, dass analog zu den Stickoxidemissionen auch in Bezug auf die Mittelwerte der Schwefeloxidemissionen mit deutlich unter 200 mg/Nm³ die geringsten Emissionsniveaus bei den Stroh- und Getreidebrennstoffen nachzuweisen sind (vgl. Kapitel 3.1.1). Bei Getreidekörnern liegt dieses Niveau mit 300 bis

³ Anlagen der Nummer 1.3: Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas in Feuerungsanlagen durch den Einsatz anderer als in Nummer 1.2 genannter fester oder flüssiger Brennstoffe (z.B. Einsatz von Stroh oder ähnlichen pflanzlichen Materialien etc.)

⁴ Anforderungen für Wirbelschichtfeuerungen in Anlehnung an Punkt 5.4.1.2.1 der TA Luft mit einer Feuerungswärmeleistung unter 50 MW

450 mg/Nm³ etwas höher, wobei die höchsten Werte in allen Anlagen aufgrund der höchsten Schwefelgehalte im Brennstoff bei Winterweizen festgestellt wurden.

Die in vorhergegangenen Projekten ermittelten Zusammenhänge zwischen den Schwefelgehalten der Brennstoffe und den SO_x-Emissionen zeigten für alle untersuchten Anlagen signifikante, positive Korrelationen (/2/, /23/, /29/). Das bedeutet, dass die Schwefeldioxidemissionen im Wesentlichen von den Brennstoffgehalten abhängig sind.

Das aber auch ein Zusammenhang zur eingesetzten Feuerungsanlagentechnologie besteht, konnte durch den Einsatz von Referenzbrennstoffen in verschiedenen Anlagen nachgewiesen werden. Während bei den Messungen am Agro 40 gegenüber dem HKRST 30 um ca. 22 % für Winterweizenkörner und um ca. 43 % für Wintergerstenkörner tiefere Mittelwerte nachgewiesen wurden, zeigten, wenn auch auf tiefem absoluten Niveau, Winterweizenstrohpellets um etwa 50 % höhere Werte (s. Abb. 110).

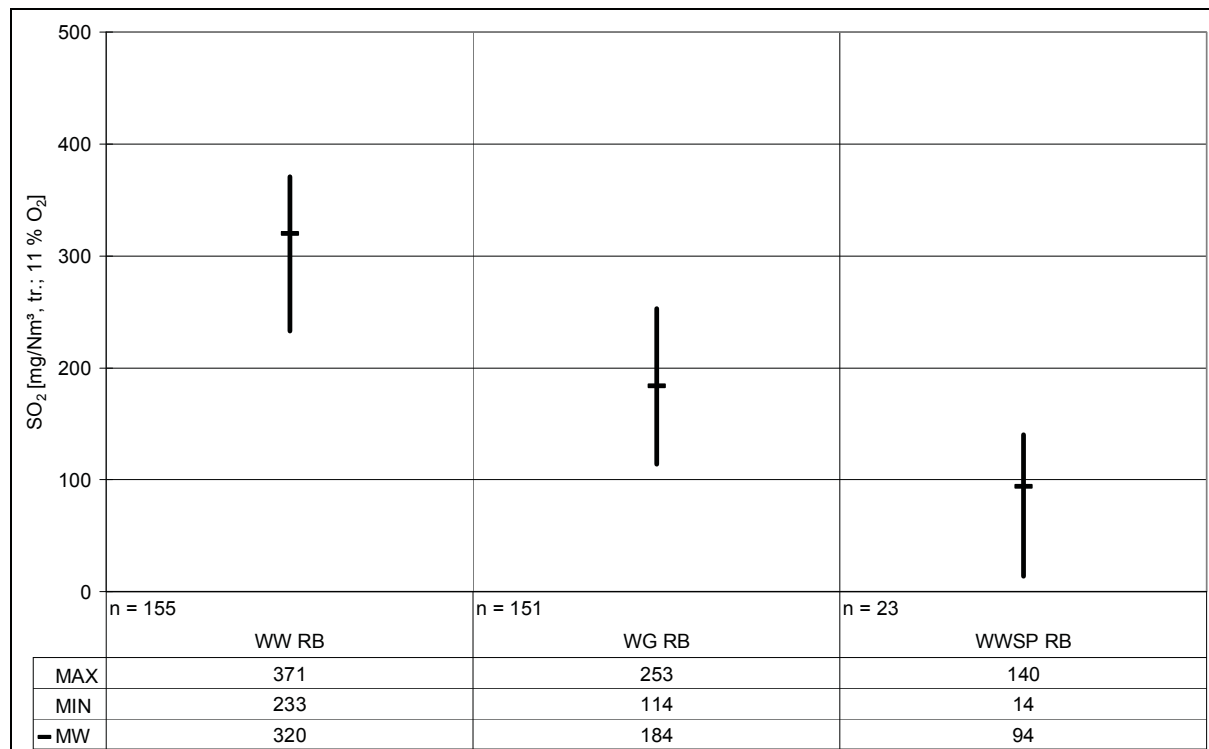


Abbildung 110: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am Agro 40, Firma Agroflam – 2006/07; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

3.2.6 Chlorwasserstoffemissionen (HCl)

Die untersuchten Feuerungsanlagen zeigen neben brennstoffbedingten auch anlagenspezifische Unterschiede bei den gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen (s. Abb. 111 und 112).

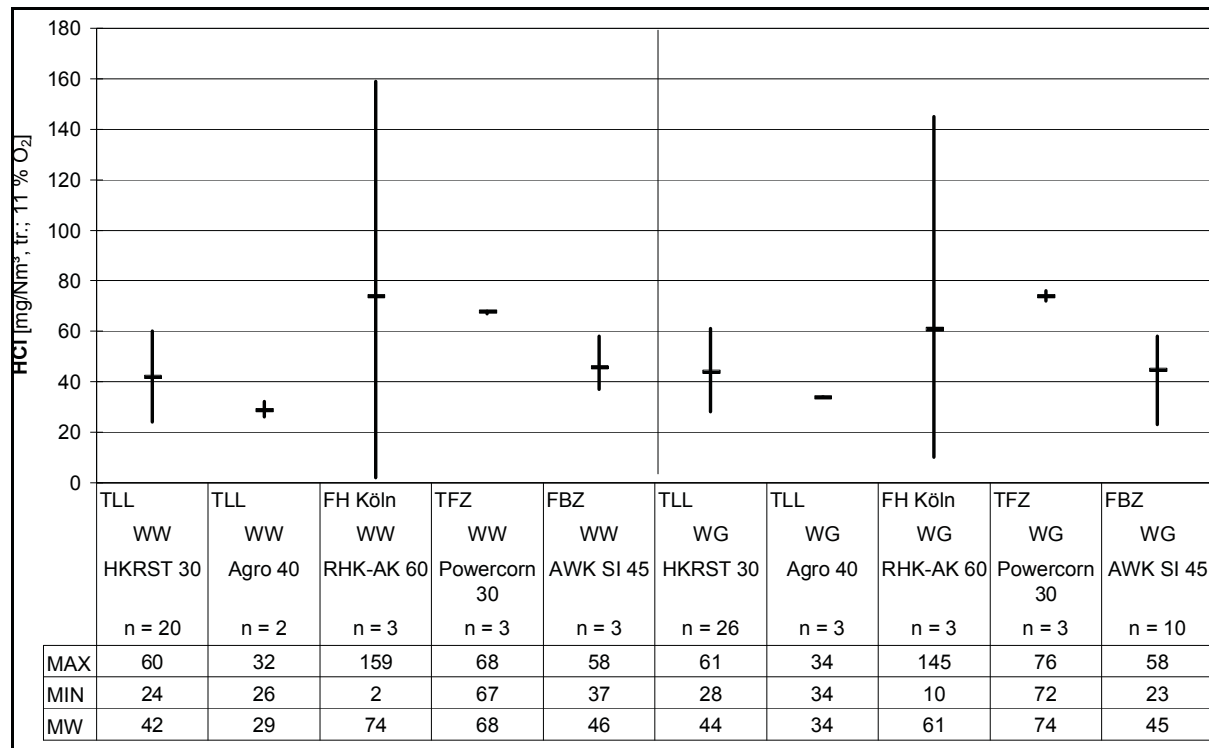


Abbildung 111: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe Winterweizenkörner (WW) und Wintergerstenkörner (WG) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Bei den Versuchen mit dem mit 0,26 % i. d. TM (vgl. Kapitel 2.3.1.3.) chlorhaltigsten Referenzbrennstoff Winterroggenstrophpellets (WRSP RB) wurden auch die mit Abstand höchsten HCl-Konzentrationen im Abgas ermittelt. Die erwartungsgemäß niedrigsten HCl-Gehalte bei allen untersuchten Feuerungsanlagen und Brennstoffen wurden beim Einsatz von Winterweizenstrophpellets (WWSP RB mit 0,04 % Chlor i. d. TM) im Agro 40 bzw. RHK-AK 60 festgestellt. Bei der Verbrennung von Körnerchargen wurden im Mittel zwischen 29 und 74 mg/Nm³ (11 % Vol. O₂) nachgewiesen.

Ein Betrieb im Teillastbereich führte zu Reduktion der entstehenden HCl-Emissionen um ca. 10 % bei den eingesetzten Getreidekörnerchargen (s. Abb. 113). Durch die Senkung der Strömungsgeschwindigkeit im Abgassystem kann von einer niedrigeren Abgastemperatur mit zunehmender Kondensation ausgegangen werden [/11/].

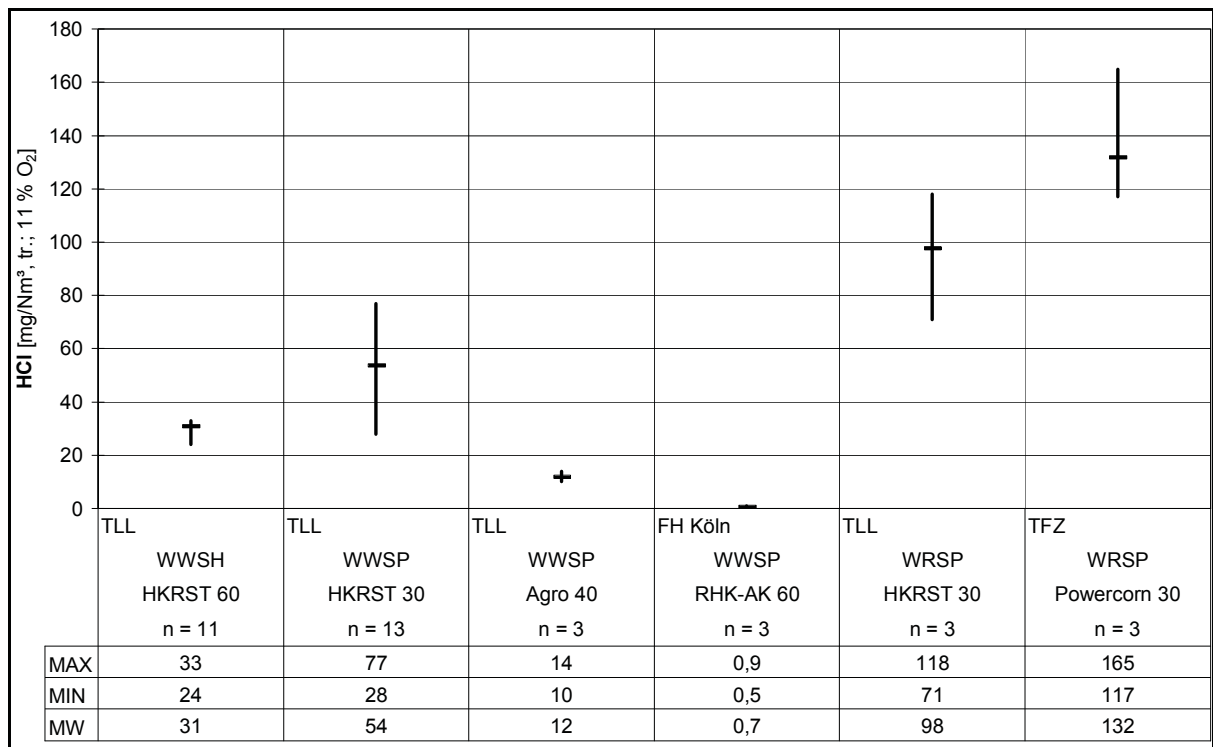


Abbildung 112: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe Winterweizen- (WWSP) und Winterroggenstrophpellets (WRSP) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

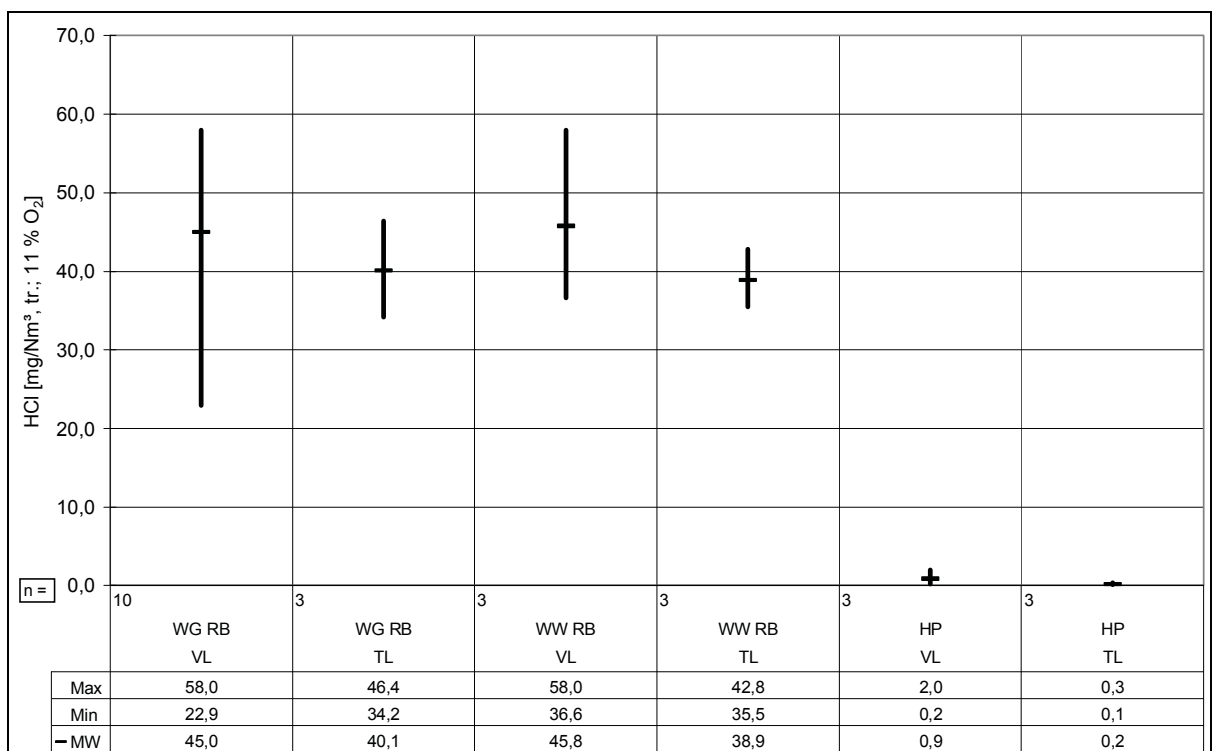


Abbildung 113: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [11/]

In Bezug auf die entstehenden Chlorwasserstoffemissionen wird damit einmal mehr deutlich, dass besonders in Kleinfeuerungsanlagen mit zunehmender Konzentration von Chlor im Brennstoff in enger Korrelation auch die Chlorwasserstoffemissionen zunehmen [2/, 23/]. Des Weiteren wird aber auch bestätigt, dass diese festgestellten Tendenzen bei größeren Anlagenleistungen nicht auftreten [29/]. Das deutet darauf hin, dass neben den Chlorgehalten im Brennstoff, die Leistungsklasse der Anlagen, die Laststufe aber auch die Feuerraumgeometrie und die Qualität der Verbrennung zu unterschiedlichen Ascheeinbindungsraten des Chlors führen und somit die HCl-Konzentrationen im Abgas beeinflussen.

Legt man für eine Bewertung der HCl-Emissionskonzentrationen die Anforderungen der TA Luft einen Grenzwert von 30 mg/m³ für Anlagen < 1 MWth (11 % Vol. O₂) zugrunde⁵, wird deutlich, dass dieser nur von ausgesuchten Brennstoffen in ausgewählten Anlagentechnologien eingehalten werden kann. Größere Anlagen bzw. Anlagen zur Verbrennung von Strohhäckseln (vgl. Kapitel 3.1) weisen dabei deutliche Vorteile gegenüber kleineren Feuerungsanlagen auf.

Möglichkeiten zur Chlorwasserstoffemissionsminderung

Um die sauren Abgasbestandteile Schwefeloxide und Chlorwasserstoff zu mindern, müssen als primäre Maßnahme die Gehalte der Elemente Schwefel und Chlor im Brennstoff möglichst niedrig gehalten werden. Eine sekundäre Maßnahme zur Reduzierung der sauren Abgasbestandteile stellt die Zugabe von Additiven dar. Bei Versuchen des ILK konnte eine bis zu 50 %-ige Verringerung der SO₂-Konzentration im Rauchgas festgestellt werden. Genutzt wurden hierfür reine Weizenstrophpellets (Ø 12 mm) und hochaktives Kalkhydrat [Ca(OH₂)] der Marke „WÜLFRAAsorp“ (Fa. Rheinkalk). Als Heizkessel diente das Modell „C0“ der Firma Ökotherm mit einer Nennwärmeleistung von 49 kW [1/].

⁵ allgemeiner Teil nach Punkt 5.2.4 TA Luft

3.3 Ergebnisse der speziellen diskontinuierlichen Messungen

Aufgrund der bislang nur geringen Datengrundlage und auf Anforderung des Bundesumweltministeriums (BMU) wurden an ausgewählten Anlagen in Zusammenarbeit mit Messstellen nach § 26 BImSchG bzw. Landesmessstellen wiederholt Konzentrationen von PCDD/F, PAK und BTX bestimmt. Da in halmgutartigen Brennstoffen ein relativ hoher Anteil von Chlor enthalten sein kann, wird davon ausgegangen, dass sich bei der Verbrennung Dioxine/Furane etc. bilden. Bestandteil der Projekte war daher, eine erweiterte Datenbasis von Messwerten in Bezug auf diese speziellen Emissionsparameter zu schaffen. Unter der Vielzahl möglicher Bildungsmechanismen von Dioxinen und Furanen wird dem Aufbau aus den zugehörigen Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor bei unvollständiger Verbrennung durch die „de novo“-Synthese große Bedeutung zugeschrieben. Der Aufbau erfolgt dabei durch Cyclisierungsreaktionen von halogenierten Grundbausteinen oder über Halogenierungsreaktionen der aromatischen Zwischen- und Endprodukte, wie chlorierten Benzolen und Phenolen die bei der unvollständigen Verbrennung zwischen 300 und 600 °C entstehen können. Dioxinverbindungen entstehen bevorzugt in Abkühlzonen und können sich vermehrt an Staubpartikel anlagern. Bei höheren Temperaturen zerfallen die Verbindungen wieder. Metallionen (z.B. Kupfer) können die Bildung der PCDD/F katalysieren.

Interessanterweise entstehen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kraftwerken praktisch keine Dioxine. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Schwefelgehalte von über 5 : 1 in diesen Brennstoffen die Dioxinbildung verhindert, da elementares Chlor durch eine Konkurrenzreaktion mit Schwefeldioxid abgefangen wird [51/, /52/].

Soweit nicht anders in den Abschlußberichten der Partnerprojekte aufgeführt, wurde die Bestimmung der Gehalte an PCDD/F (Polychlorierte Dibenzodioxine / Dibenzofurane) durch die anreichernde Probenahme gemäß DIN EN 1948-1 (Gekühltes-Absaugrohr-Methode) unter Berücksichtigung der VDI- Richtlinie 2066, Blatt 1 durchgeführt.

Für einige Brennstoffe lagen im Rohgas hohe Staubkonzentrationen vor. Somit hätten sich relativ schnell Staubeinlagerungen in den Dioxinkartuschen gesammelt, die zu hohen Druckverlusten geführt und damit einen Versuchsabbruch bedingt hätten. Um dem vorzubeugen wurden teilweise Glasfaserfilter zum Vorabscheiden der Partikel genutzt. Sie mussten in Abständen von ca. 15 Minuten gewechselt werden und wurden bei der späteren Analyse im Labor in das Ergebnis einbezogen. Aus den eingesandten Proben für die Dioxinbestimmung wurden durch die Analysenlabore gleichzeitig auch die Gehalte an PAK (16 nach EPA einschließlich Benzo(a)pyren) ermittelt.



Abbildung 114: PCDD/F Probenahme an der Praxisanlage in Dobia am HKRST 30 (links), Messpodest für PCDD/F-Messungen in Seedorf am Linka H 400 (rechts)

Aufgrund der umfangreichen Vorbereitungen und Kosten wurden diese Untersuchungen ausschließlich unter Verwendung der Referenzbrennstoffe durchgeführt. Es war z.B. an mehreren Praxisanlagen notwendig, die Abgasmessstrecken den Anforderungen entsprechend anzupassen. In mehreren Fällen mussten spezielle Messpodeste erbaut werden (s. Abb. 114). Die im folgenden dargestellten Ergebnisse der diskontinuierlichen Messungen beziehen sich auf einen Restsauerstoffgehalt von 11 % im trockenen Abgas unter Normbedingungen.

3.3.1 Emissionen an Polychlorierten Dibenzo– Dioxinen und Furanen (PCDD/F) und Polychlorierten Biphenylen (PCB)

Die Ergebnisse der Dioxin- bzw. Furanmessung für die Kornbrennstoffe sind in den Abbildungen 115 bis 119 (vgl. Kapitel 3.1.1) dargestellt. Im Geltungsbereich der 4. BImSchV bzw. der TA Luft können im Rahmen des Genehmigungsverfahrens Grenzwerte für PCDD/F herangezogen werden. Dabei liegt der Grenzwert bei 0,1 ng/Nm³ bei 11 % Vol. O₂. Im Referentenentwurf zur Novellierung der 1. BImSchV wird im Rahmen der Typenprüfung von Kleinf Feuerungsanlagen für Getreide bzw. Stroh ein Grenzwert von 0,1 ng/Nm³ bei 13 % Vol. O₂ vorgeschlagen. Mit Ausnahme von unter besonders schlechten Ausbrandbedingungen durchgeführten Einzelmessungen (s. Abb. 120), konnte eine generelle deutliche Unterschreitung dieses Wertes nachgewiesen werden. Dabei gilt nach den Rundungsregeln ein Wert bis 0,149 ng/Nm³ als Unterschreitung des Grenzwertes.

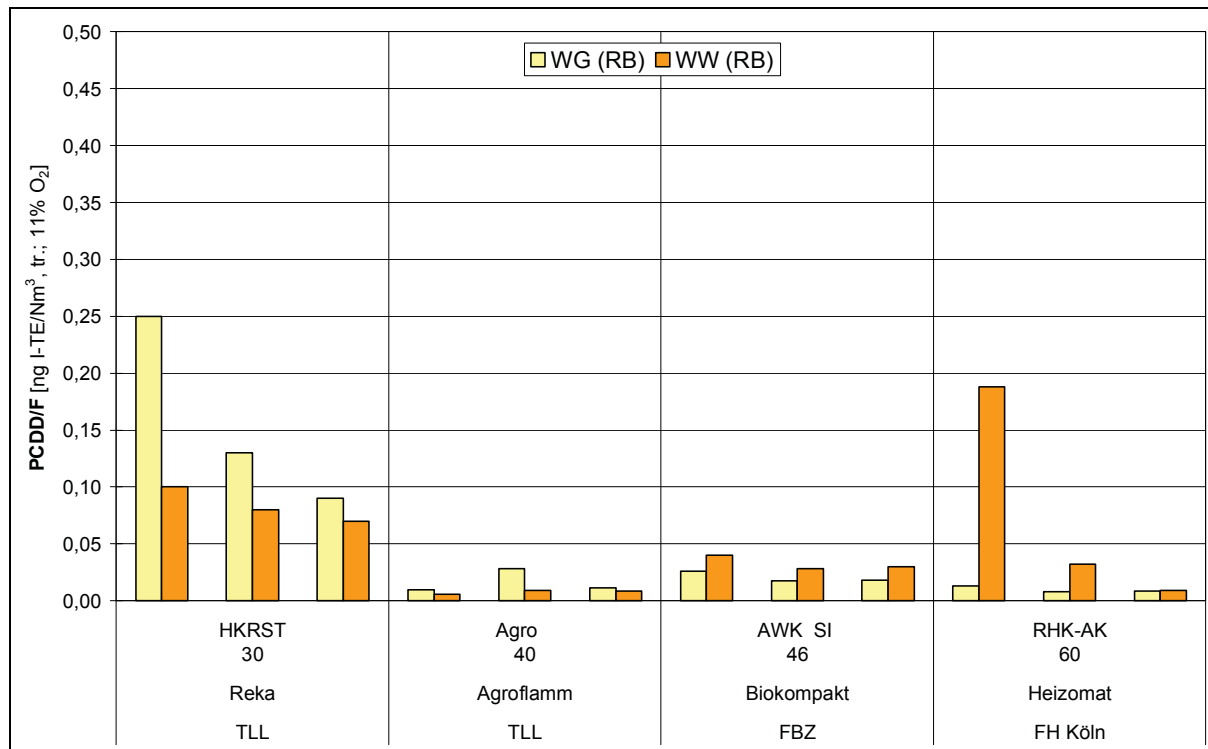


Abbildung 115: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizen- bzw. Wintergerstenkörner – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die während der Verbrennung herrschenden Bedingungen sind dabei von besonderer Bedeutung. So konnte nachgewiesen werden, dass bei Unterschreitung der CO-Konzentrationen im Rohgas von 1 g/Nm³ bei 13 % Vol. O₂, generell die PCDD/F-Werte unterhalb des o.g. Grenzwertes lagen (s. Abb. 116 und 117). Bei höheren CO-Konzentrationen ist die Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen dieses Wertes dagegen höher, wenn auch nicht zwangsläufig (s. Abb. 118 und 119). Daher sollten Phasen schlechten Ausbrandes möglichst auf niedrigem Niveau gehalten bzw. schnell durchschritten werden. Noch deutlicher wird die Abhängigkeit der PCDD/F-Entstehung von der Ausbrandqualität beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets in der Anlage HKRST 30. Hier wurden, bei einem sehr schlechten Wartungszustand der Anlage und im Nachgang festgestellten Schädigungen der Sekundärluftzuführungen, nur ungenügende Ausbrandergebnisse erreicht (vgl. Kapitel 3.1.1), welche im Ergebnis auch sehr hohe PCDD/F-Werte generierten (s. Abb. 120 und 121).

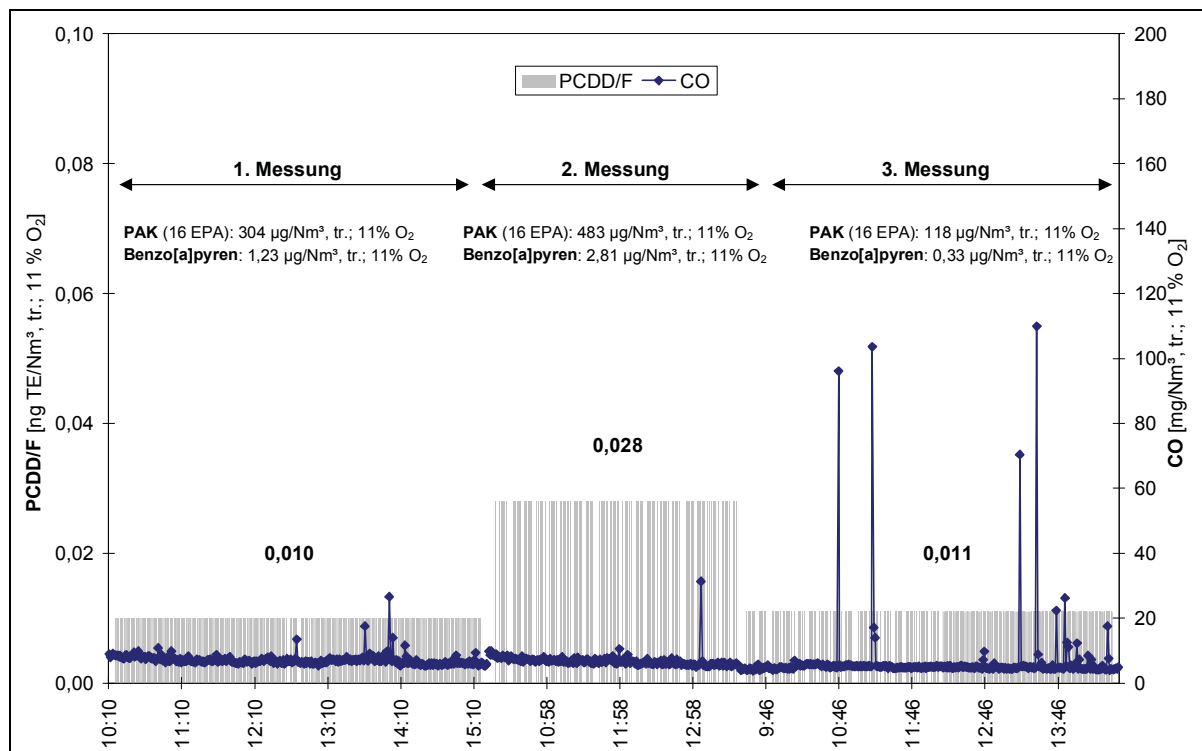


Abbildung 116: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Butteltstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

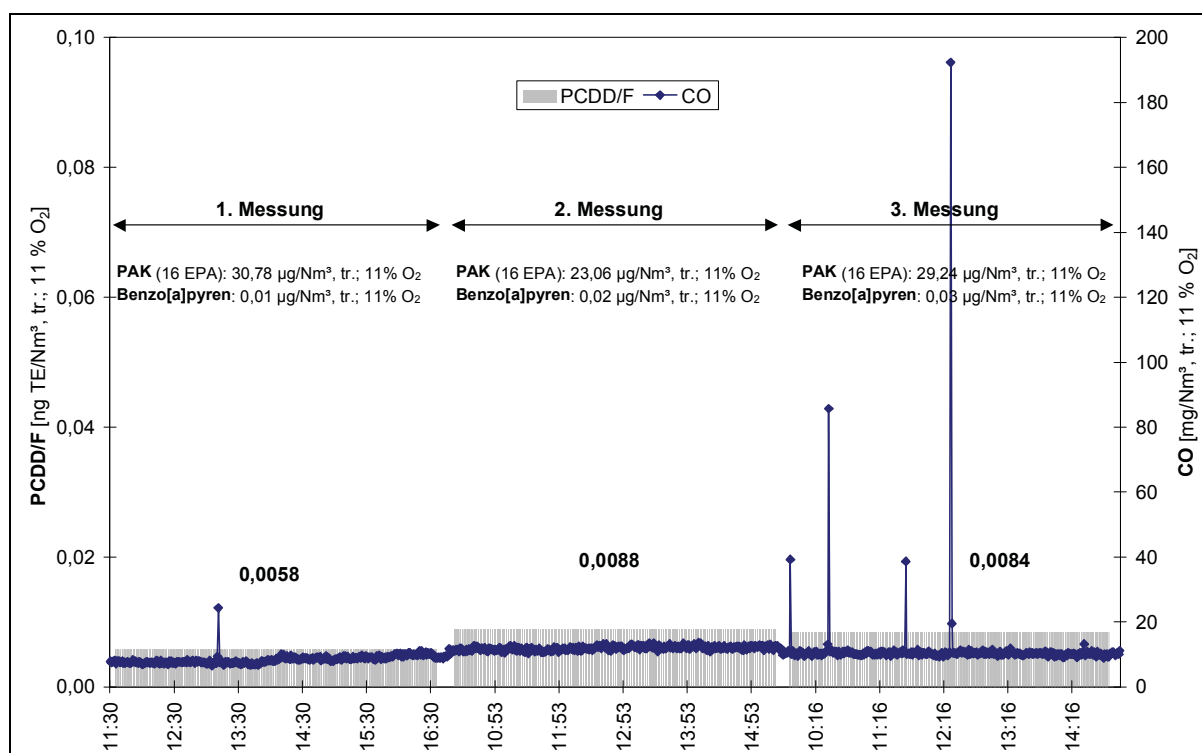


Abbildung 117: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 22.01.07 Agro 40 Standort Butteltstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

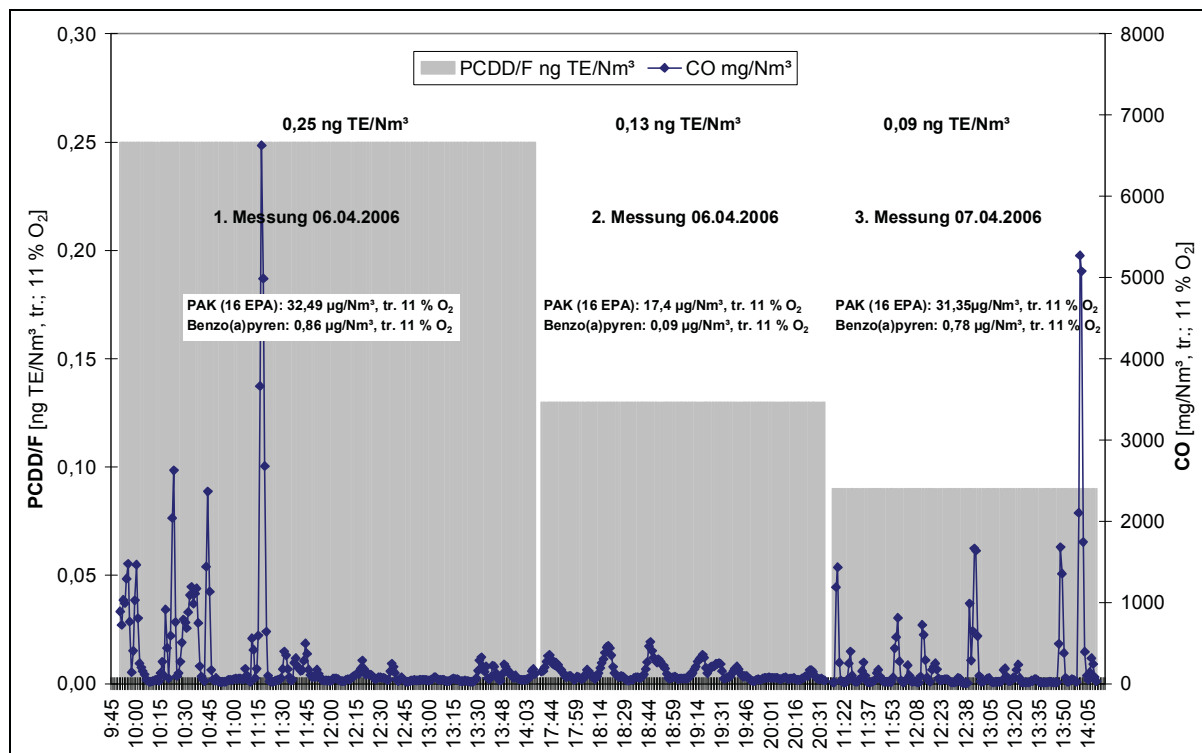


Abbildung 118: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 06./07.04.2006 HKRST 30/3 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

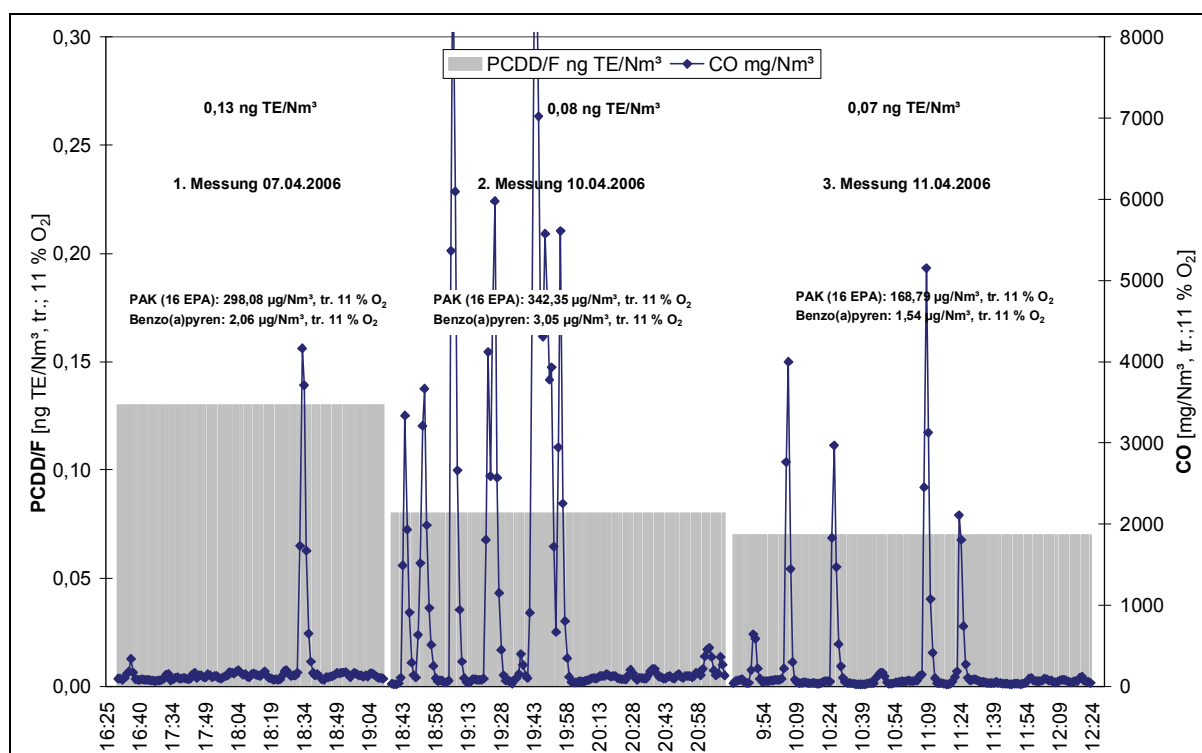


Abbildung 119: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 07./10./11.04.2006 HKRST 30/3 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

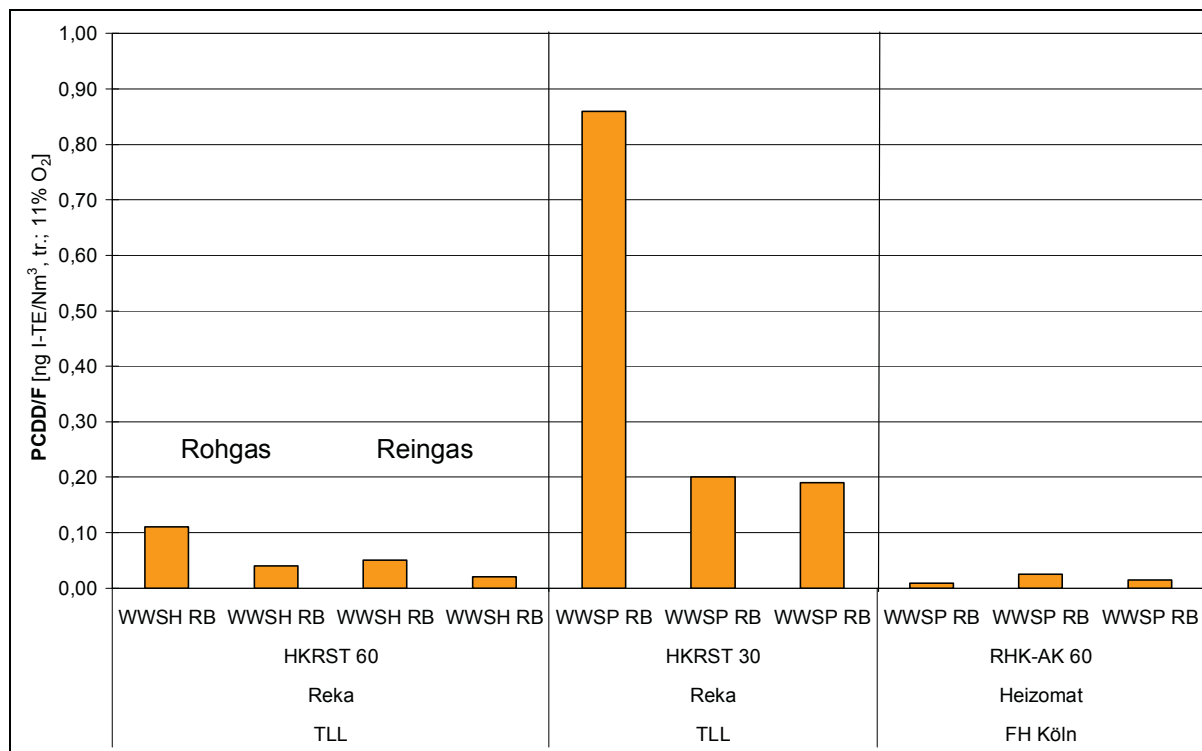


Abbildung 120: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

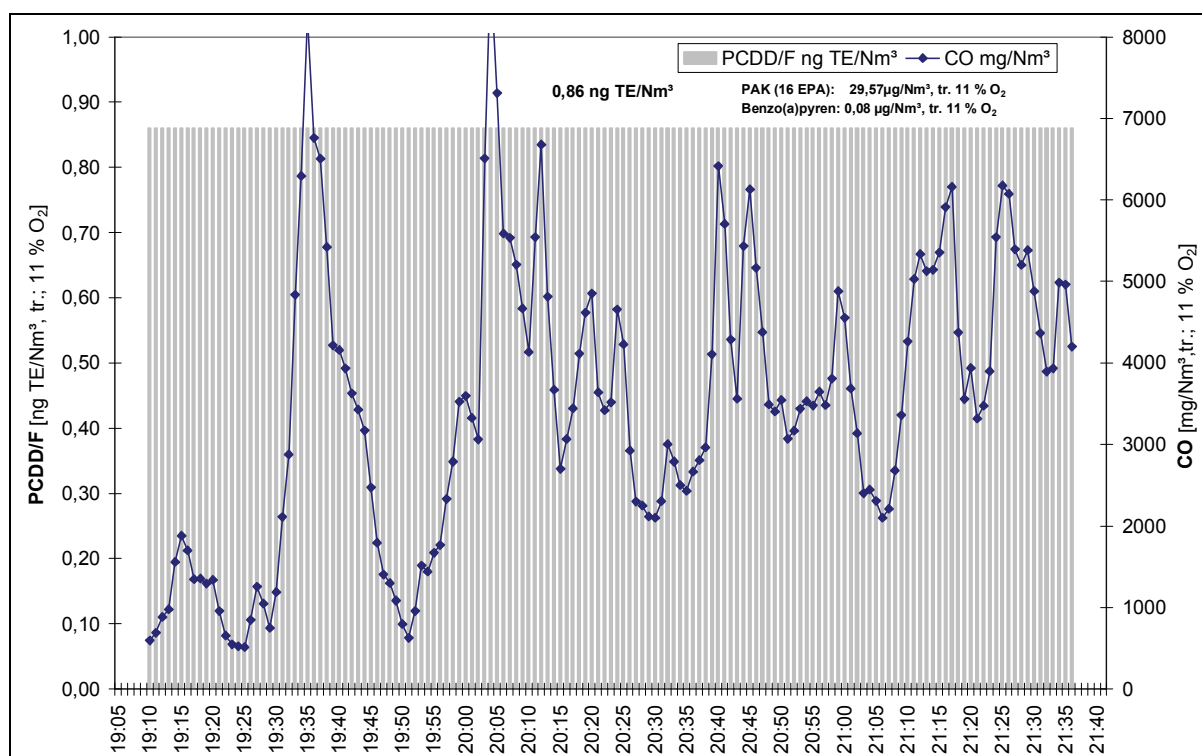


Abbildung 121: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), 11.04.2006 – HKRST 30/3, Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Untersuchungen zum Teillastverhalten wurden nur in geringem Umfang gemacht. Dabei wurden keine Überschreitungen selbst des TA Luft Grenzwertes ($0,1 \text{ ng/Nm}^3$ bei 13 % Vol. O_2) festgestellt (s. Abb. 122). Die beim Betrieb in Teillast im Mittel etwas höheren CO -Emissionen (vgl. Kapitel 3.2.1) führten dabei nicht in jedem Fall zu höheren PCDD/F-Emissionen. Die Stichprobenumfänge der Messungen sind allerdings zu gering, um endgültige Aussagen treffen zu können.

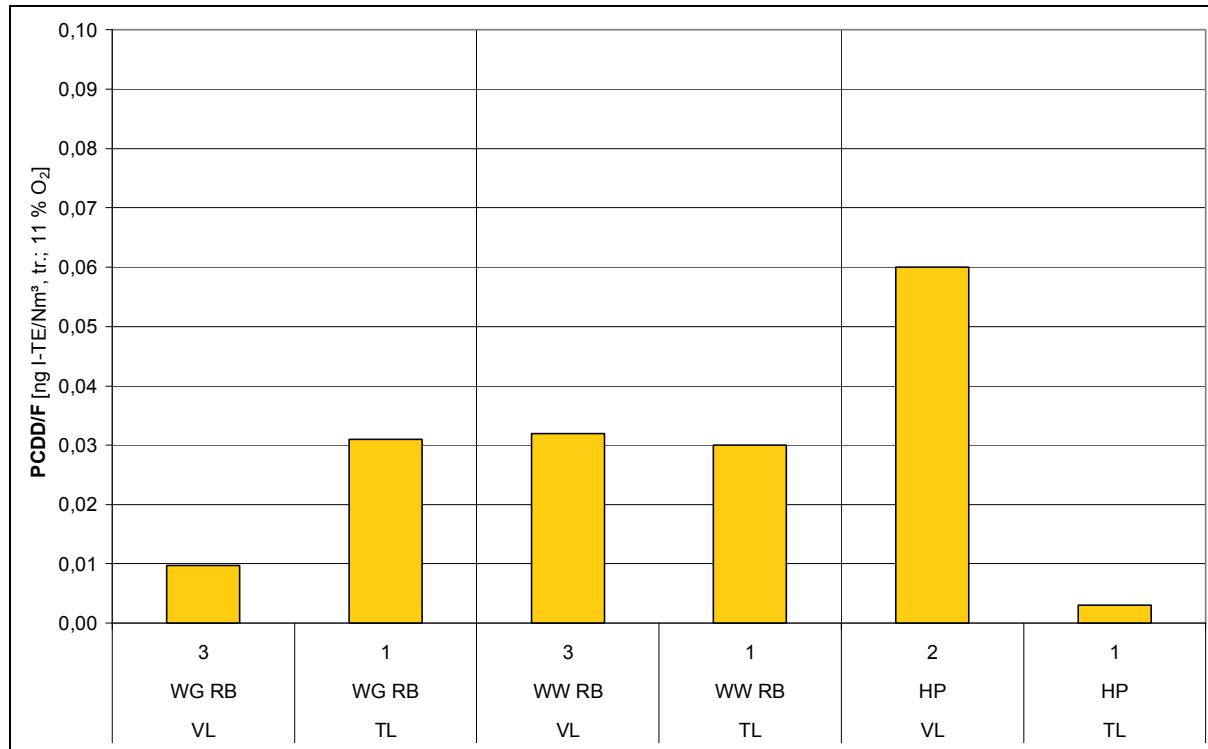


Abbildung 122: Vergleich der PCDD/F-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [11]

Bei den Untersuchungen zur Abhängigkeit der PCDD/F-Emissionen vom Chlorgehalt im Brennstoff muss festgestellt werden, dass zwar tendenziell höhere PCDD/F-Werte bei höheren Chlorgehalten entstehen können, dass diese aber viel abhängiger von der eingesetzten Anlagentechnologie bzw. den erreichbaren Ausbrandergebnissen (CO -Emissionen) sind (s. Abb. 123).

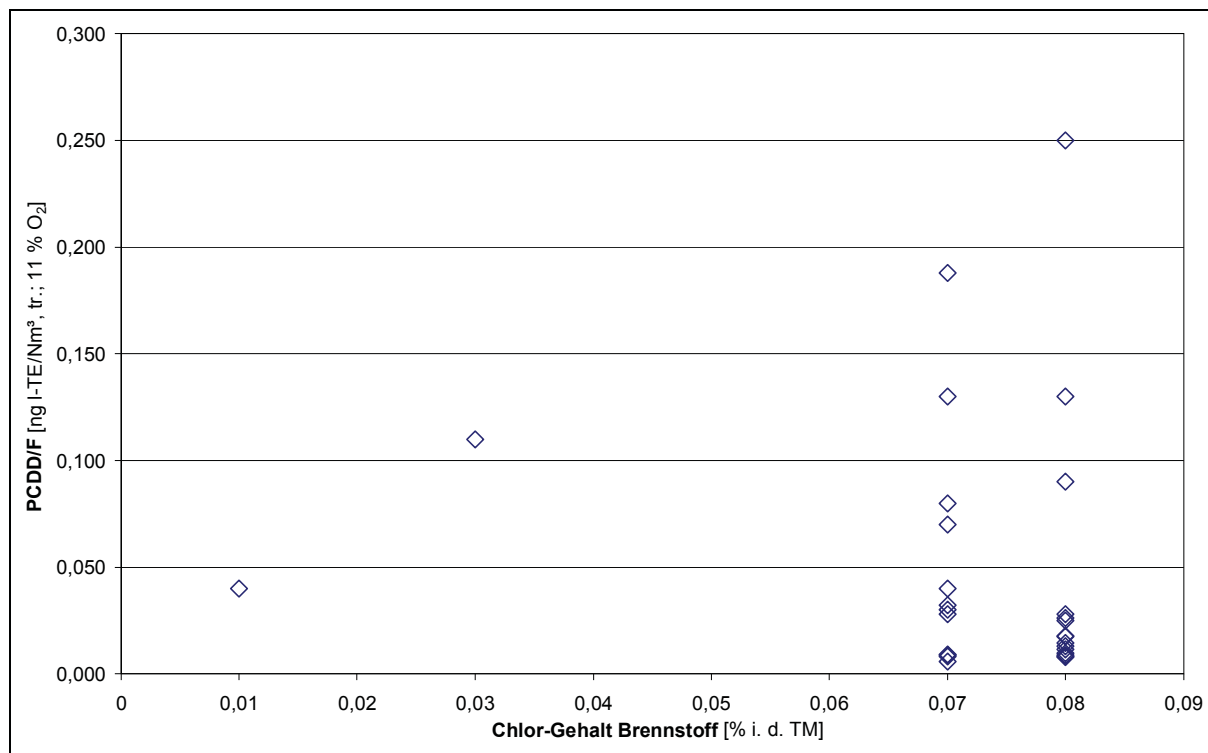


Abbildung 123: Entwicklung der PCDD/F-Emissionskonzentrationen in Abhängigkeit vom Chlorgehalt Brennstoff – Rohgasuntersuchungen der Referenzbrennstoffe in Praxisanlagen [HKRST 30 (WW/WG) und 60 (WWSH); Agro 40 (WW/WG); RHK-AK 60 (WW/WG/WWSP) und AWK SI 45 (WW/WG)]

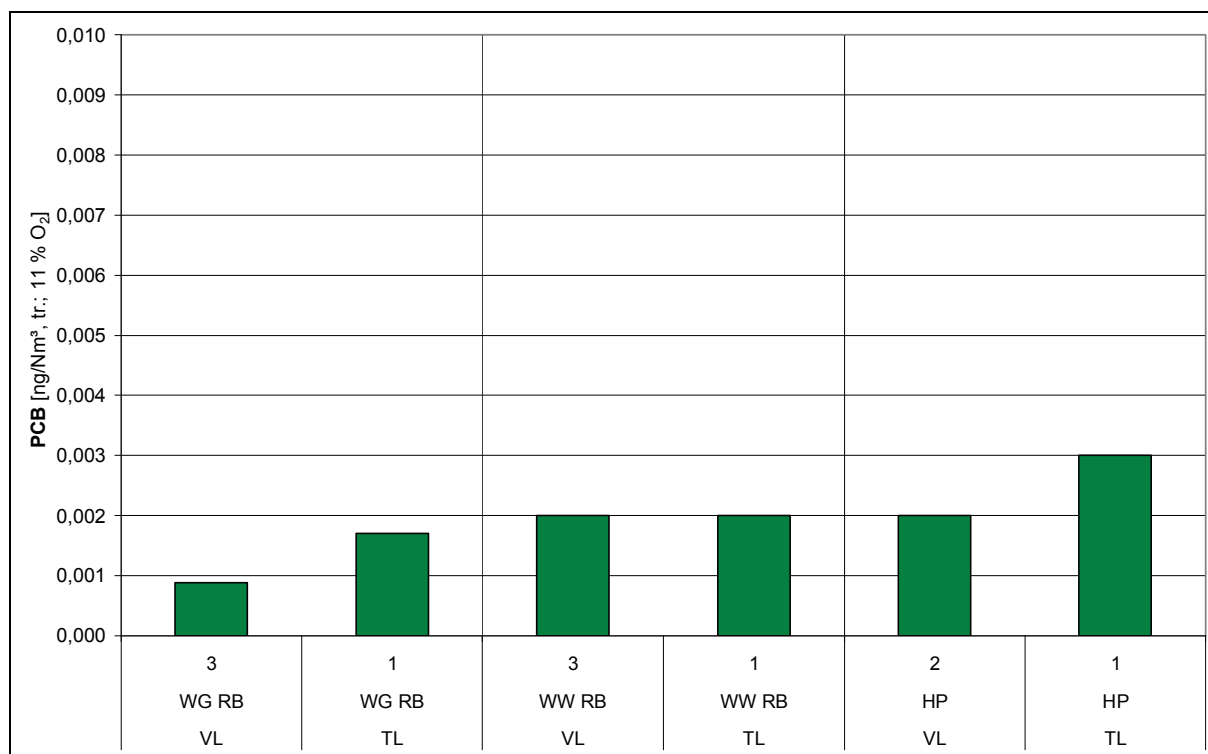


Abbildung 124: Vergleich der Polychlorierte Biphenyle (PCB)-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [1/11]

Für die in diesem Zusammenhang gemessenen und der Vollständigkeit dienenden, hier dargestellten Ergebnisse der Messungen der Polychlorierten Biphenyle weisen z.T. höhere Werte bei Betrieb in Teillast auf. Auffällig ist weiterhin, dass die Werte für DIN-Holzpellets dabei doppelt bis dreifach so hohe absolute Werte aufweisen wie die untersuchten Getreidekörnerchargen (s. Abb. 124).

3.3.2 Emissionen an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Benzo(a)pyren

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bilden eine Stoffgruppe von organischen Verbindungen, die aus mindestens zwei und mehreren miteinander verbundenen Benzolringen bestehen. Eine der gefährlichsten Verbindungen dieser Stoffgruppe ist das Benzo(a)pyren. In der TA Luft ist für diese Leitkomponente (Tracer) ein Grenzwert von 0,05 mg/Nm³ bezogen auf 11 % Restsauerstoff angegeben. Dieser wurde bei allen vorgenommenen Messungen deutlich unterschritten (s. Abb. 125). Selbst eine große Anzahl der festgestellten PAK-Emissionen lag bereits unter dem Grenzwert für die Leitkomponente (s. Abb. 126 und 127).

Diese geringen Werte wurden ebenso bei den Untersuchungen an den reinen Strohfeuerungsanlagen (vgl. Kapitel 3.1) bzw. bei den Untersuchungen zum Teillastverhalten festgestellt (s. Abb. 128).

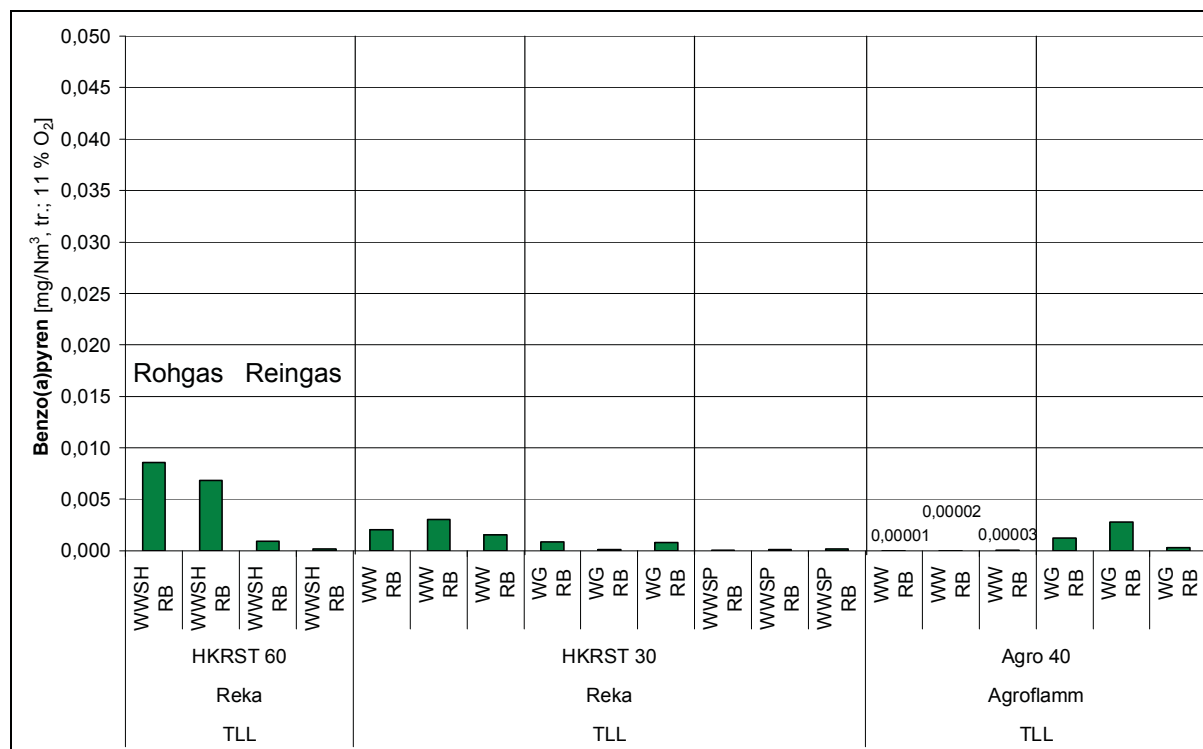


Abbildung 125: Vergleich der Benzo(a)pyren-Emissionskonzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) und Winterweizen- (WW RB) sowie Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

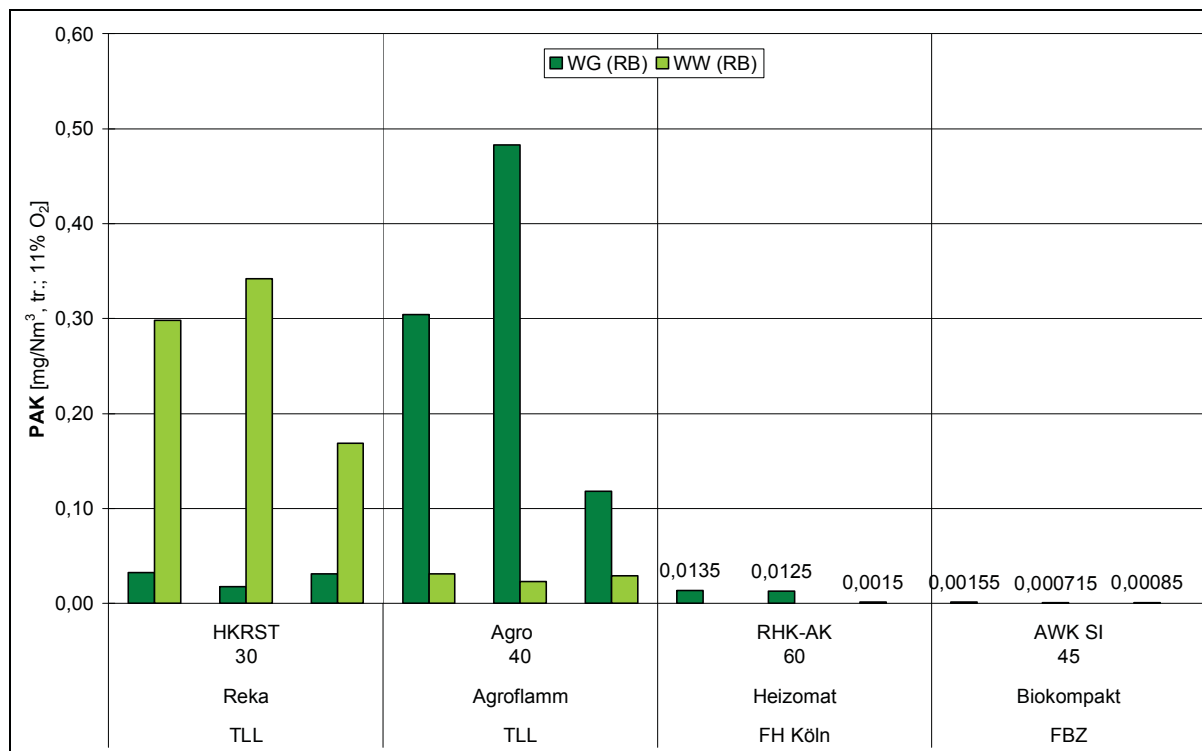


Abbildung 126: Vergleich der PAK-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizen- bzw. Wintergerstenkörner (WW RB) bzw. (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

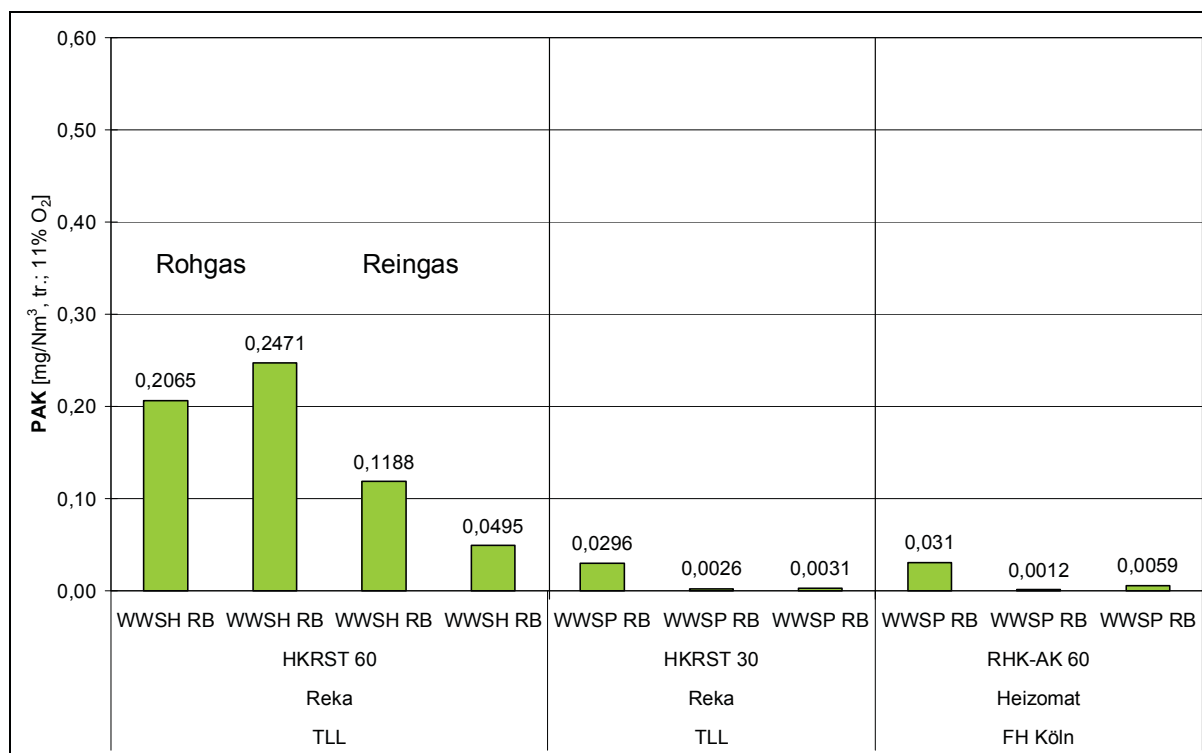


Abbildung 127: Vergleich der PAK-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

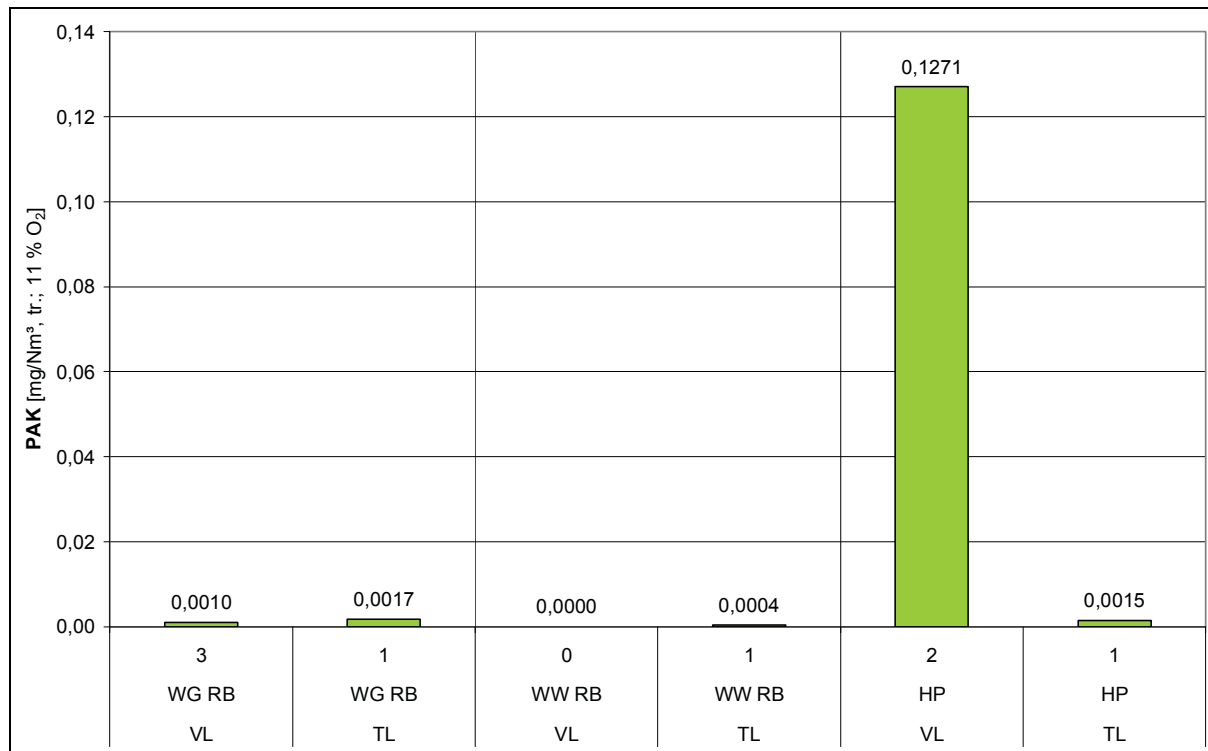


Abbildung 128: Vergleich der PAK-Konzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [/11/]

Die Untersuchungen der PAK-Emissionen bei unterschiedlichen Lastzuständen verdeutlichen den engen Zusammenhang zu den Ausbrandergebnissen (CO-Emissionen bei DIN Holzpellets – HP [/11/]) .

3.3.3 BTX-Emissionen

BTX ist ein Summenparameter für die Stoffe Benzol, Toluol und Xylol. Hinsichtlich der Messungen der BTX-Aromaten konnten mit den untersuchten Referenzbrennstoffen, mit Ausnahme einiger weniger Einzelwerte resultierend aus schlechten Verbrennungsbedingungen Werte unterhalb der Nachweisgrenze (below detection limit - bdl) festgestellt werden (s. Abb. 129). Selbst die bei hohen CO-Konzentrationen gemessenen Summenwerte für BTX überschreiten dabei nicht den für die Einzelkomponente in der TA Luft aufgeführten Grenzwert für Benzol von 1 mg/Nm³.

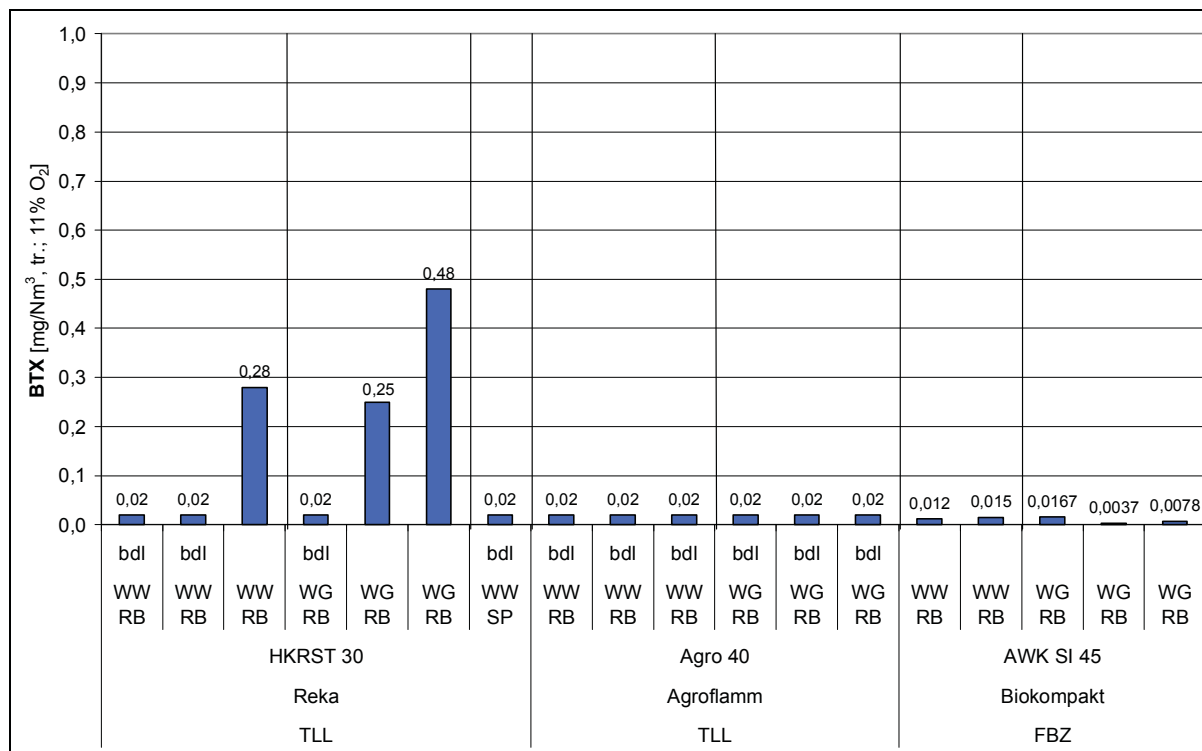


Abbildung 129: Vergleich der BTX-Emissionskonzentrationen bei Volllast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen; bdl – below detection limit [unter Nachweisgrenze]

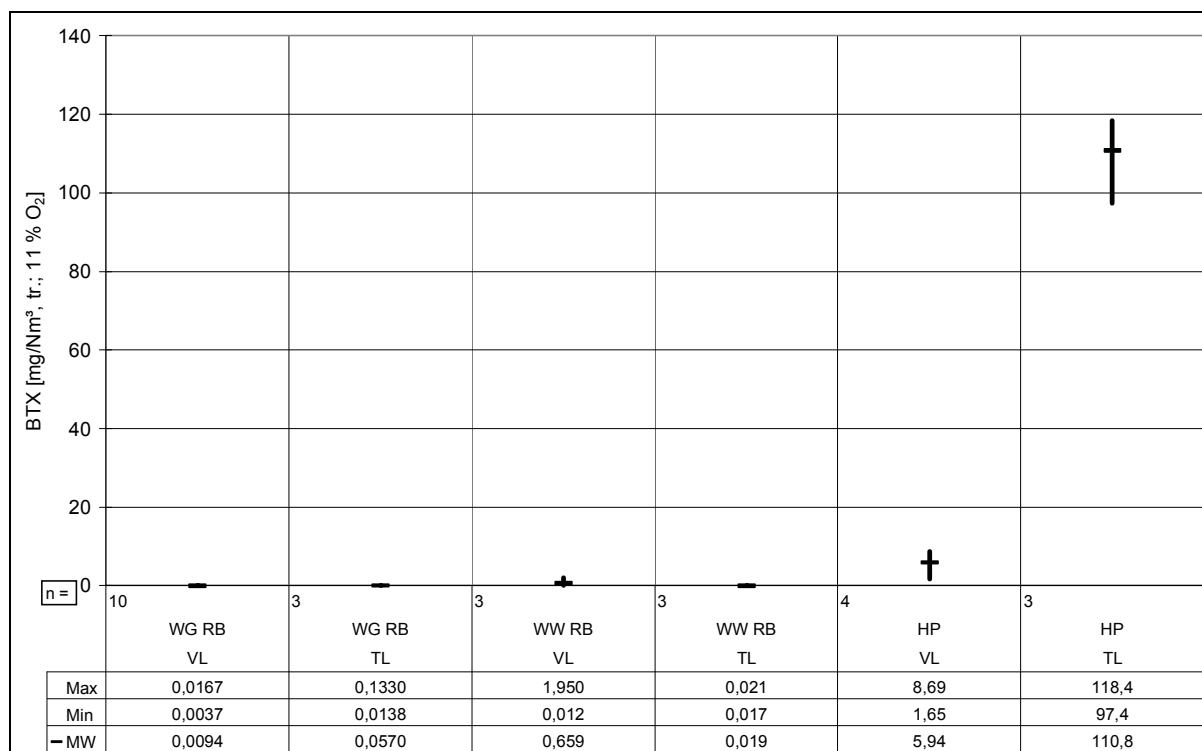


Abbildung 130: Vergleich der BTX-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [11/]

Hinsichtlich der Messungen zum Teillastverhalten ist anzumerken, dass es hier zu extrem erhöhten Gehalten an BTX bei der Verbrennung von DIN-Holzpellets gegenüber den Referenzbrennstoff-Getreidekörnerchargen kam, welche bei der Verbrennung in Teillast noch deutlicher werden. Diese außergewöhnlich hohen Werte bedürfen einer weiteren Wiederholungsmessung. Im Fall der Untersuchung der Winterweizenkörner wurde ein Ausreißerwert von $1,95 \text{ mg/Nm}^3$ festgestellt (s. Abb. 130). Ansonsten wurden mit Ausnahme der Holzpellets keine erhöhten Emissionen bei Teillast gegenüber Volllast festgestellt.

Benzol

Innerhalb der Messkampagne wurden für ausgewählte Referenzbrennstoffe die Gehalte an Benzol im Rauchgas bestimmt. Die dabei angewandte Methode nach VDI 2457 (Verfahrensanweisung VA-E-005 gemäß ILK-Qualitätsmanagement-Handbuch) basiert auf einer Gasprobennahme und Adsorption an fester Sammelphase (Aktivkohleröhrchen, Fa. SKC). Das adsorbierte Benzol/Benzen wird nach Aufbereitungsschritten über die Analyse mittels Gaschromatographen und nachgeschalteter FID-Einheit quantifiziert.

Benzol gilt als krebserregender Stoff und wird in der TA Luft auf einen Grenzwert von 1 mg/m^3 bei 11 % Restsauerstoff begrenzt. Dieser wurde bei allen vorgenommenen Messungen deutlich unterschritten und lag außer dem Referenzbrennstoff Winterweizenkörner unterhalb der Nachweisgrenze (s. Abb. 131). Analog zu den BTX-Werten wurden dieselben Ausreißerwerte für Winterweizenkörner sowie DIN-Holzpellets in Volllast bzw. Teillast festgestellt (s. Abb. 132).

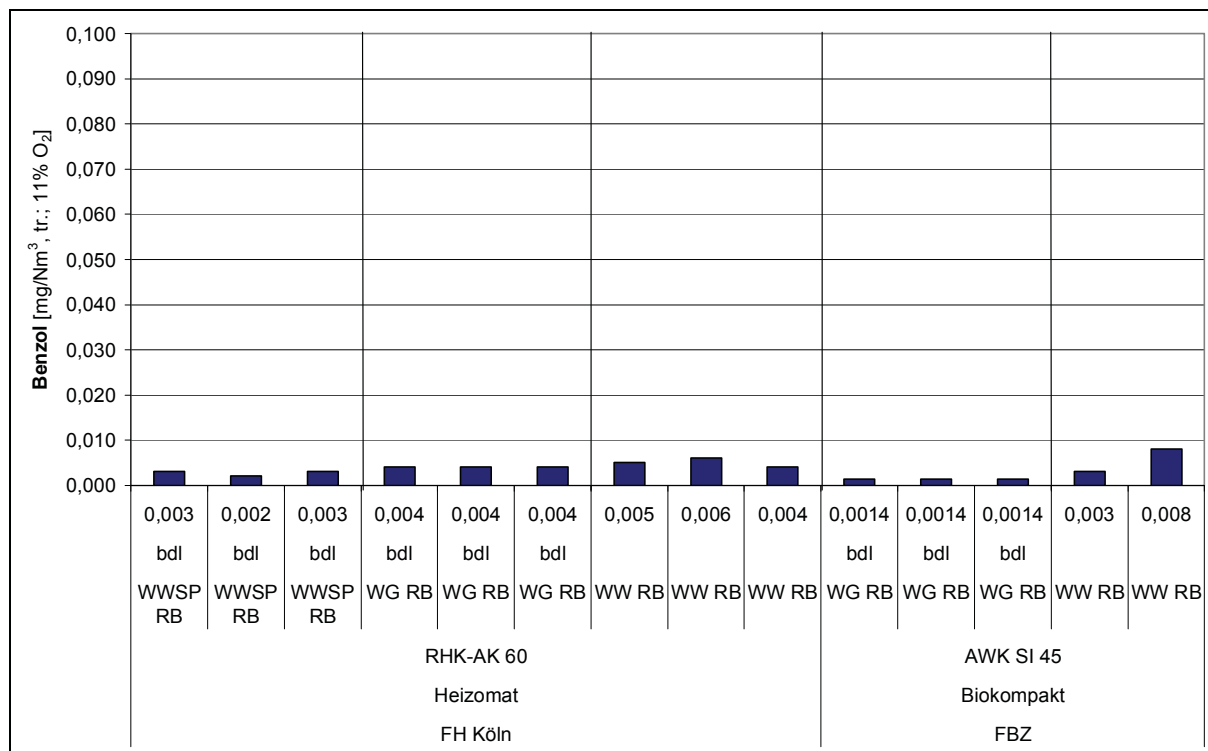


Abbildung 131: Vergleich der Benzol-Emissionskonzentrationen bei Vollast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen; bdl – below detection limit [unter Nachweisgrenze]

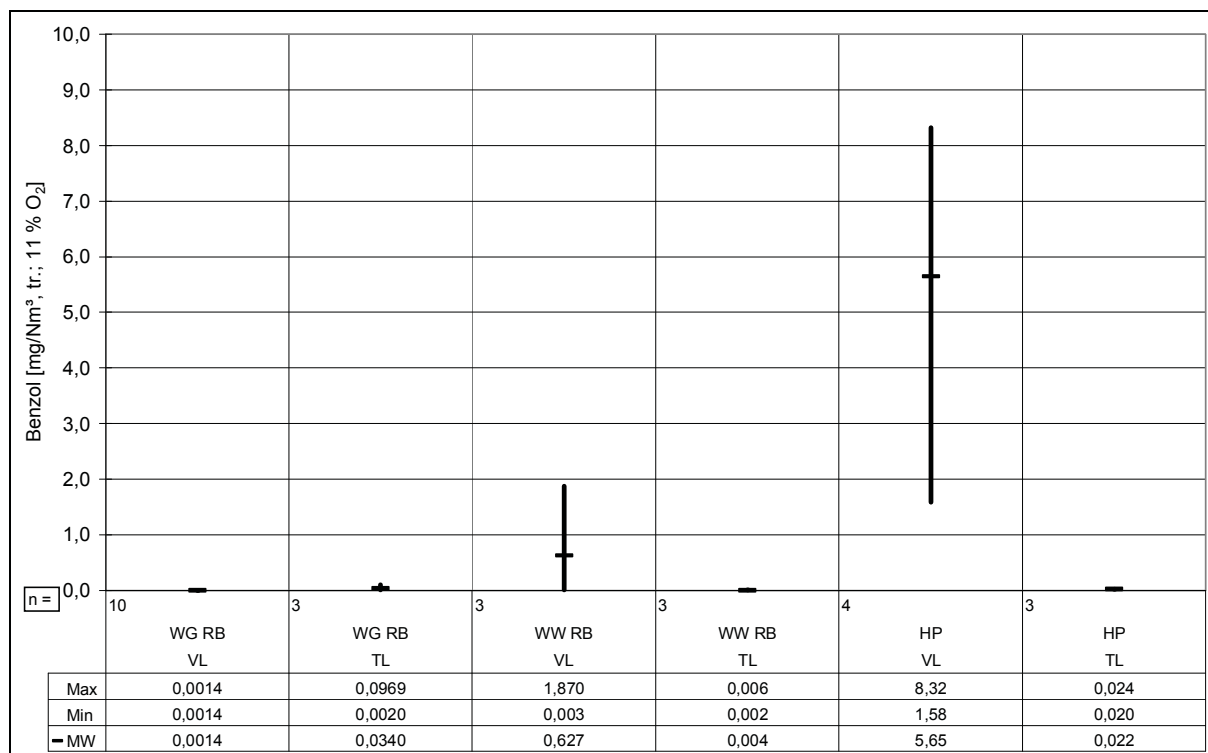


Abbildung 132: Vergleich der Benzol-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen [11/]

4. Ergebnisse der Forschungsaktivitäten – Zusammenfassung

Die Ergebnisse der im Rahmen der Bekanntmachung bewilligten Forschungsprojekte werden im folgenden zusammengefasst. In Bezug auf eine vollständige Darstellung wird auf die entsprechenden Abschlußberichte der einzelnen Zuwendungsempfänger verwiesen. Sie sind die wesentliche Grundlage der im Folgenden dargestellten Ergebnisse.

Die Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung (F & E) werden in primäre und sekundäre Maßnahmen unterschieden. Unter primären Maßnahmen werden dabei die Entwicklung neuer Konversionstechniken bzw. Steuerungsmaßnahmen verstanden. Hier sind exemplarisch die Entwicklungen neuer Kessel- und Brennertechnologien, die FLOX-Technologie (flammenlose Oxidation) bzw. im Bereich der Steuerungsmaßnahmen die Entwicklung von Sensoren zu nennen. Unter dem Bereich der sekundären Maßnahmen wird die Entwicklung von Abscheidetechnologien verstanden. In mehreren Projekten erfolgte so z.B. die Entwicklung von Elektroabscheidesystemen für Stäube. Des Weiteren wurden aber auch andere Filtersysteme entwickelt erprobt bzw. optimiert. Hier sind beispielsweise Schütttschichtfilter, Alpha-Filter, Edelstahl-Gewebefilter etc. zu nennen.

4.1 FH Bingen (FKZ 22017903) [/12/]

Entwicklung einer Low-NOx-Feuerung nach dem FLOX-Prinzip in Kleinf Feuerungsanlagen < 50 kW

Aufgrund signifikanter Unterschiede der halmgutartigen Brennstoffe gegenüber holzartigen Brennstoffen insbesondere bei Asche-, Stickstoff- und Chlorgehalten sowie bei den Ascheerweichungstemperaturen wurde im Rahmen des Projektes der FH Bingen versucht, eine spezielle thermische Konversionstechnologie einzusetzen, um den genannten kritischen Inhaltstoffen und deren bekannten Auswirkungen auf ihr Bildungspotential von Luftschadstoffen bzw. Störungen der Funktionalität bzw. des Dauerbetriebes der Anlagen entgegenzuwirken (s. Abb. 133).

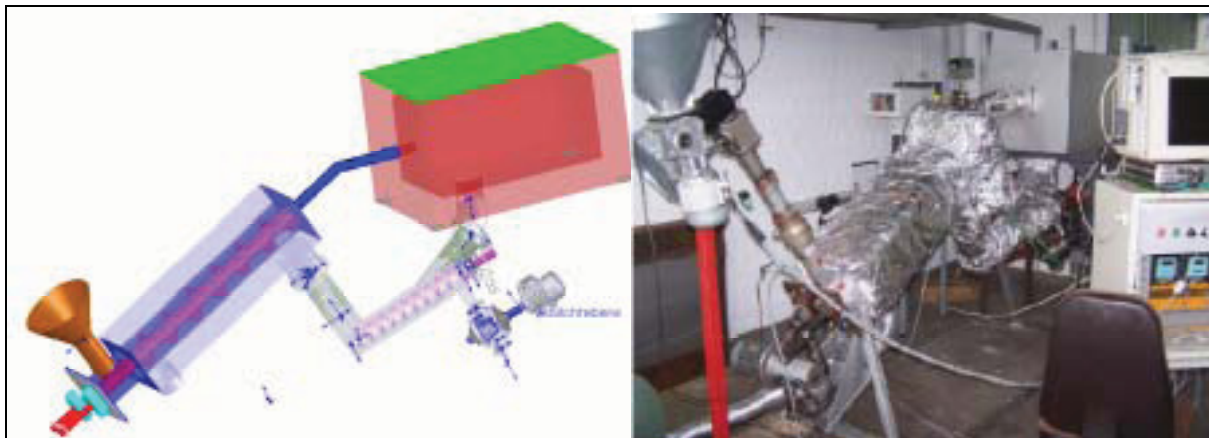


Abbildung 133: CAD-Konstruktion FLOX-Pyrolysereaktor (links) Versuchsaufbau des FLOX-Reaktors im Technikum der FH Bingen (rechts)

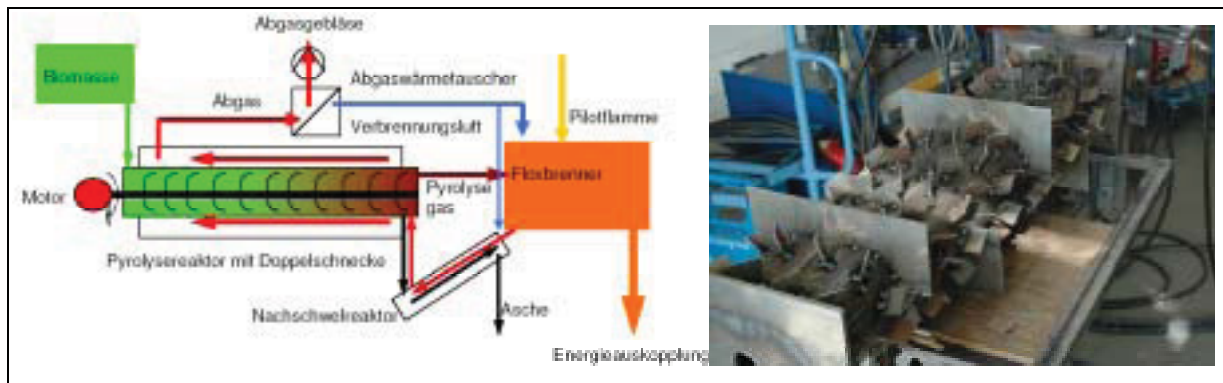


Abbildung 134: Prinzipbild des Biomasse (links) Grundkonstruktion des Pyrolysereaktors (rechts)

Durch die Anwendung des FLOX-Verfahrens (Flammlose Oxidation) mit interner Abgasrezirkulation wird es möglich, die Temperaturen im Brenner herabzusetzen und damit die Bildung von thermischen Stickoxiden zu verhindern (s. Abb. 134). Die indirekte Erwärmung des Brennstoffes über die Wärme der Abgase der Floxfeuerung unterhalb der Ascheerweichungstemperaturen erfolgt um die Biomasse allotherm bei ca. 700 °C zu pyrolysieren. Ein gezieltes Einbringen weiterer Verbrennungsluft und Wasserdampf im Nachschwelreaktor (s. Abb. 135) bewirkt eine weitgehende Umsetzung des nach der Pyrolyse noch vorhandenen Restkohlenstoffes bei 900 °C.

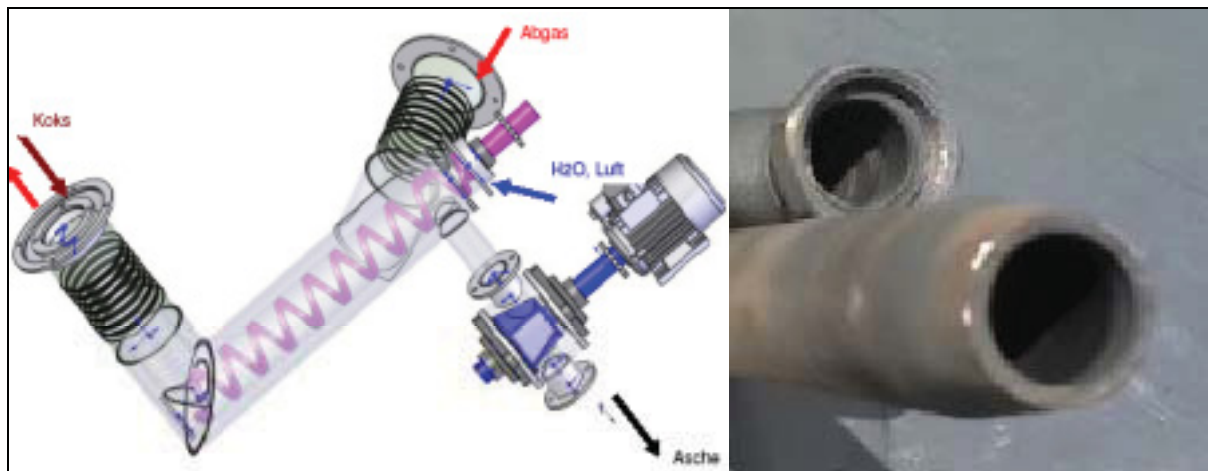


Abbildung 135: Nachschwelreaktor (links) Pyrolysegasrohr (rechts)

Das entstehende Pyrolysegas gelangt in die Floxfeuerung und reagiert mit vorgewärmter Verbrennungsluft unter geringem Luftmangel. Eine nachgeschaltete Reaktionszone (Verbrennungsluftstufung mit Oberluft) gewährleistet einen vollständigen Ausbrand. Durch die Pyrolyse mit Nachschwelreaktor werden in Abhängigkeit der Art der Biomasse bis zu 80 % des Energieinhaltes der Biomasse bzw. ca. 90 % der Brennstoffmasse bei lufttrockenem Brennstoff in Pyrolysegas umgewandelt. Anfallende Asche hat im gegenwärtigen Versuchsstadium TOC-Gehalte (total organic carbon – gesamter organisch gebundener Kohlenstoff) von ca. 10 % (s. Abb. 136). In Bezug auf eine Deponierung sind geringere Gehalte (< 5 %) notwendig. Mit Hinblick auf eine mögliche Verwendung als

Bodenverbesserer (Terra Preta) sind eher hohe Gehalte wünschenswert. Ohne Nutzung des Nachschwelreaktors liegt der TOC-Gehalt bei ca. 95 %.



Abbildung 136: Pyrolyseaschen Weizenkörner (links) Weizenschrot (rechts)



Abbildung 137: Mit Staub belegte Impaktorstufen

Die erzielbaren Staubkonzentrationen zeigen neben sehr geringen Massenkonzentrationen ($< 20 \text{ mg}$) eine ähnliche Korngrößenverteilung ($d_{ae} > 2,5 = 80 \%$, $10 > d_{ae} > 2,5 = 18,5 \%$, $d_{ae} > 10 = 1,5 \%$) (s. Abb. 137).

Hinsichtlich des Betriebsverhaltens kann angemerkt werden, dass der Reaktor nach mehr als 500 Betriebsstunden frei von Ablagerungen und Verschlackungen ist. Die Pyrolysegas führenden Bauteile sind frei von festsitzenden Ablagerungen. Kleinere Betriebsstörungen traten nur im Bereich der Brennstoffzuführung und der Koksaustragung auf. Diese konnten aber durch Anpassung der Konstruktion beseitigt werden.

Eine mit dieser Technologie mögliche Konversion mit geringem Sauerstoffüberschuß weist zwar den selben Zusammenhang steigender Stickoxidkonzentrationen mit steigenden Brennstoffstickstoffgehalten auf, weist aber nach, dass eine deutliche Minimierung gegenüber konventionellen Verbrennungssystemen besteht (s. Abb. 138).

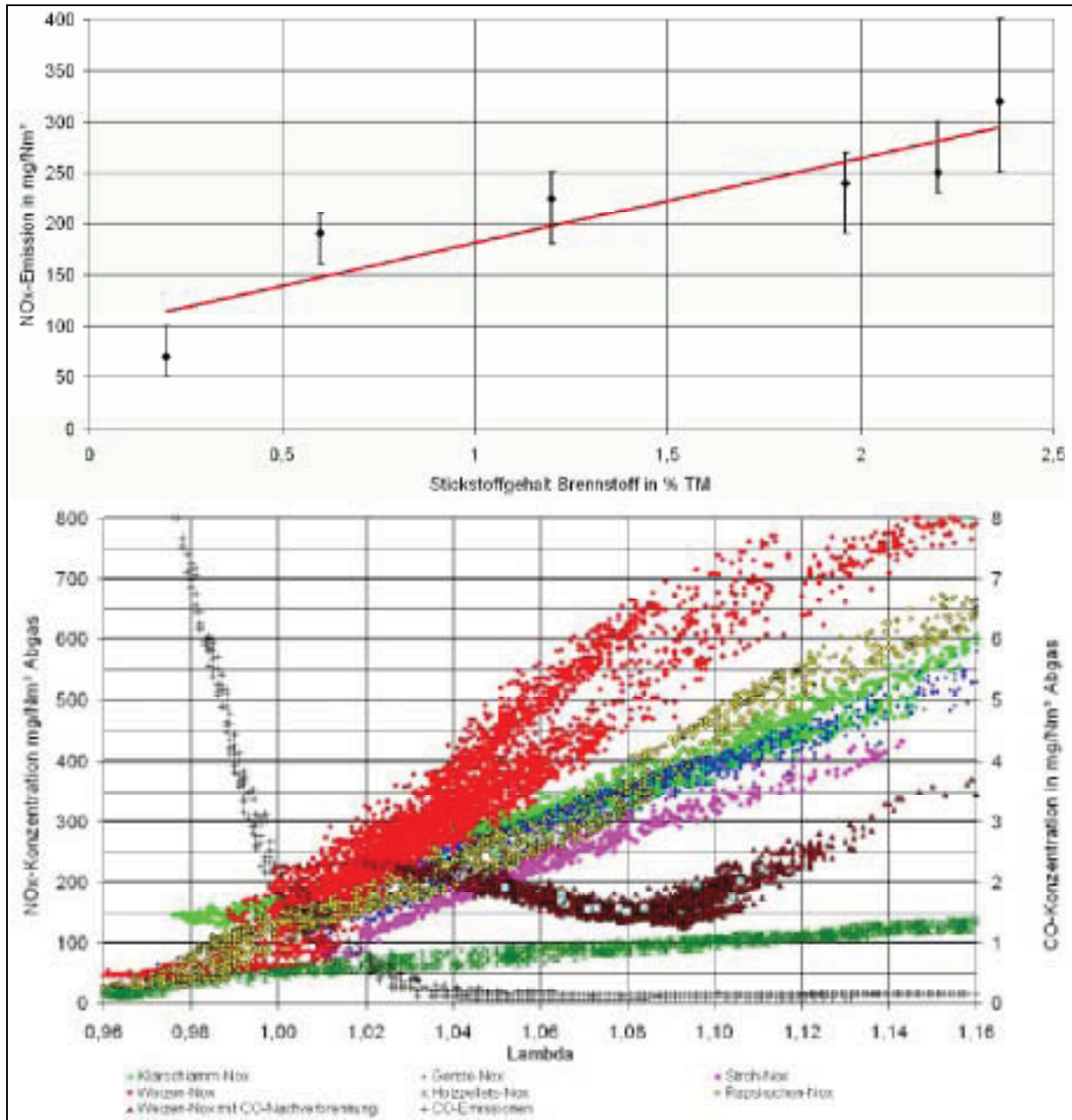


Abbildung 138: Abhängigkeit der Stickoxidemissionen vom Brennstoffstickstoffgehalt (oben) und Abhängigkeit der Stickoxidemissionen vom Luftüberschuß (unten)

Im Projekt konnte eine Konversionstechnik für Getreide und Halmgut entwickelt werden, welche die Genehmigungsfähigkeit sowohl hinsichtlich der gegenwärtigen als auch hinsichtlich der deutlich höheren Anforderungen der Novelle der 1. BImSchV mit Stand vom 2.7.2009 hinsichtlich der CO-, NOx- sowie Staubkonzentrationen im Abgas gerecht wird. Sie ist mit einer großen Variation von Brennstoffen zuverlässig betreibbar. Diese gehen über naturbelassene biogene Festbrennstoffe wie z.B. Miscanthus, Trester, Rapskuchen weit

hinaus bis zu Gärresten bzw. Klärschlamm. Bei den Letztgenannten wird aufgrund der Wirtschaftlichkeit der weitere Schwerpunkt für Forschungstätigkeiten gesehen. Des Weiteren wird der Fokus auf die Verwendung der entstehenden kohlenstoffreichen Koksfraktionen evtl. im Bereich landwirtschaftlich genutzter Böden gesetzt.

Das Verfahren zur Erzeugung thermischer Energie mit einem FLOX-Brenner, bei dem Biomasse insbesondere Getreide bzw. halmgutartige Energieträger eingesetzt werden, wurde zum Patent angemeldet (Patentnummer DE2005045166B4, WO2007/033642A1) und mit dem Förderpreis der Zukunftsinitiative Rheinland Pfalz 2007 ausgezeichnet.

4.2 TU Hamburg Harburg / Firma Künzel (FKZ 22018303 / FKZ 22018503) [/13/, /14/] Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinf Feuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Stroh pellets und Getreide

Ziel des Projektes war es, eine vorhandene marktreife Kleinf Feuerungsanlage zur Verbrennung von Holz pellets für die Nutzung von Getreide und Stroh pellets umzubauen und die Genehmigungsfähigkeit nachzuweisen. Langzeittests sollten des Weiteren die Betriebssicherheit nachweisen. Das Projekt wurde als Verbundprojekt von der TU Hamburg-Harburg (TU HH) und der Firma Künzel gemeinsam bearbeitet. Der Firma Künzel oblag dabei im Wesentlichen die Fertigung und Erprobung und der TU Hamburg Harburg die Berechnungen und Emissionsmessungen sowie deren Auswertung.

Ausgehend von dem Serienkessel, einem Rieselpbrenner mit 25 kW, wurden insgesamt zwei Kesselprototypen (s. Abb. 139) sowie acht Brennerprototypen entwickelt, gebaut und erprobt (s. Abb. 140).

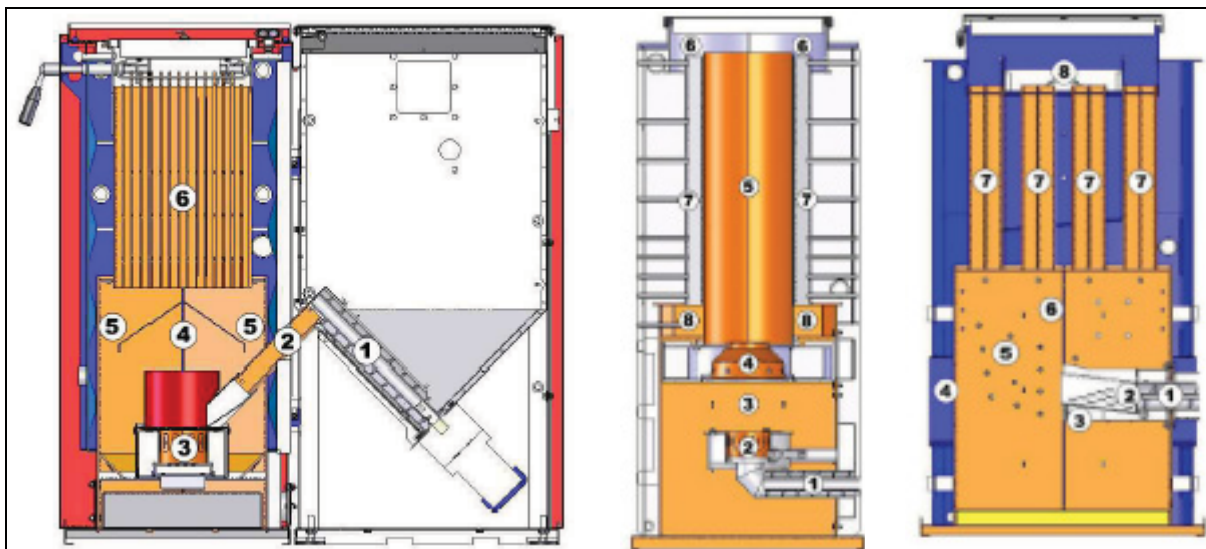


Abbildung 139: Serienreifer Rieselpbrenner (links) erster Kesselprototyp – Flammenrohrkessel (mitte) zweiter Kesselprototyp – Registerkessel mit Seitenschubbrenner(rechts)

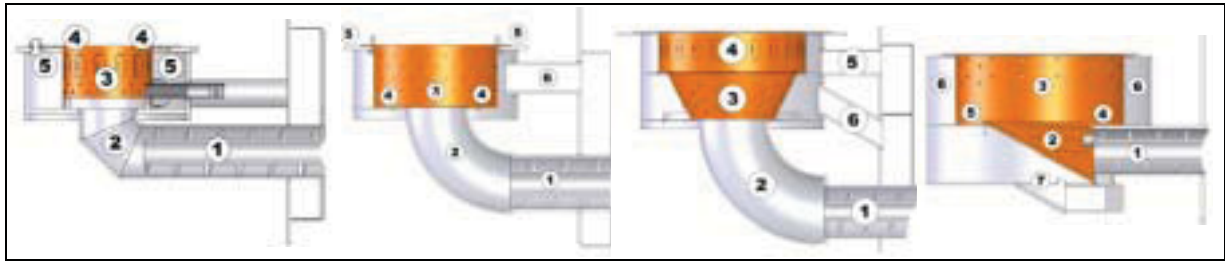


Abbildung 140: Aufbau der vier entwickelten Brennerprototypen für den Flammenrohrkessel

Fazit: Kesselprototyp 1 – Flammenrohrkessel und vier Brennertypentwicklungen

Die aus der Kesselkonstruktion des ersten Prototypen resultierende ungünstige Rauchgasführung führt zu einer Rück erwärmung der Abgase durch die Flamme. In Folge der vertikalen Ausrichtung des Flammenrohres kommt es zu einem „thermischen Gegendruck“, welcher die Abgase im Brenner in die Brennstoffschnecke drückt. Die Rauchgase kondensieren dort und verursachen Quellungen der Brennstoffpellets und damit Verklemmungen im Bereich der Brennstoffzufuhr (s. Abb. 141).



Abbildung 141: Versuche mit Unterschubbrenner – Flammenrohrkessel

Der hohe Aschegehalt und die niedrigen Ascheerweichungstemperaturen führten bei allen vier entwickelten und erprobten Brennertypen zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Verbrennung über die Betriebsdauer. Die großen Aschemengen und die Verschlackungen hatten eine ungenügende Versorgung mit Verbrennungsluft zur Folge. Ein kontinuierlicher und guter Ausbrand war somit nicht zu erreichen. Notwendige kurze Reinigungsintervalle verursachten eine stetige Zerstörung des Glutbettes und damit starke Leistungsschwankungen. Anbackungen von Flugaschebestandteilen an den Kesselteilen führten bis zum Stillstand der Anlage.

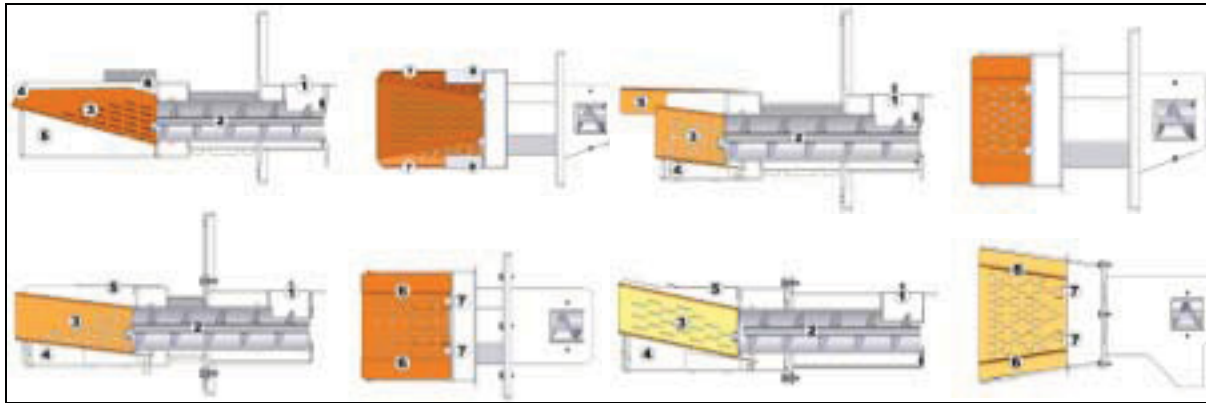


Abbildung 142: Aufbau der vier entwickelten Brennerprototypen für den Registerkessel mit Seitenschubbrenner

Fazit: **Kesselprototyp 2** – Registerkessel mit Seitenschubbrenner und vier Brennertypentwicklungen

Durch die starke Vereinfachung der Rauchgaswege im Kesselkörper und die Etablierung einer Zellenradschleuse konnten die Probleme des ersten Kesseltyps mit den zurück drückenden Rauchgasen behoben werden. Der Wechsel des Brennertypes vom Unterschubbrenner zum Seiteneinschubbrenner hat zu einer Verbesserung des „Selbstreinigungseffektes“ geführt, wodurch das Betriebsverhalten stabilisiert werden konnte. Die Emissionsergebnisse der beiden besten Brennervarianten (Registerkessel, Brennerentwicklung Nr. 5 [Variante 4] und 8 [Variante 5] [14/] s. Abb. 143 und 144) verdeutlichen den weiteren Optimierungsbedarf für halmgutartige Brennstoffe sowohl hinsichtlich der Stabilität als auch in Bezug auf die Qualität des Ausbrandes verbunden mit höheren emissionsseitigen Anforderungen (s. Novelle 1. BImSchV).

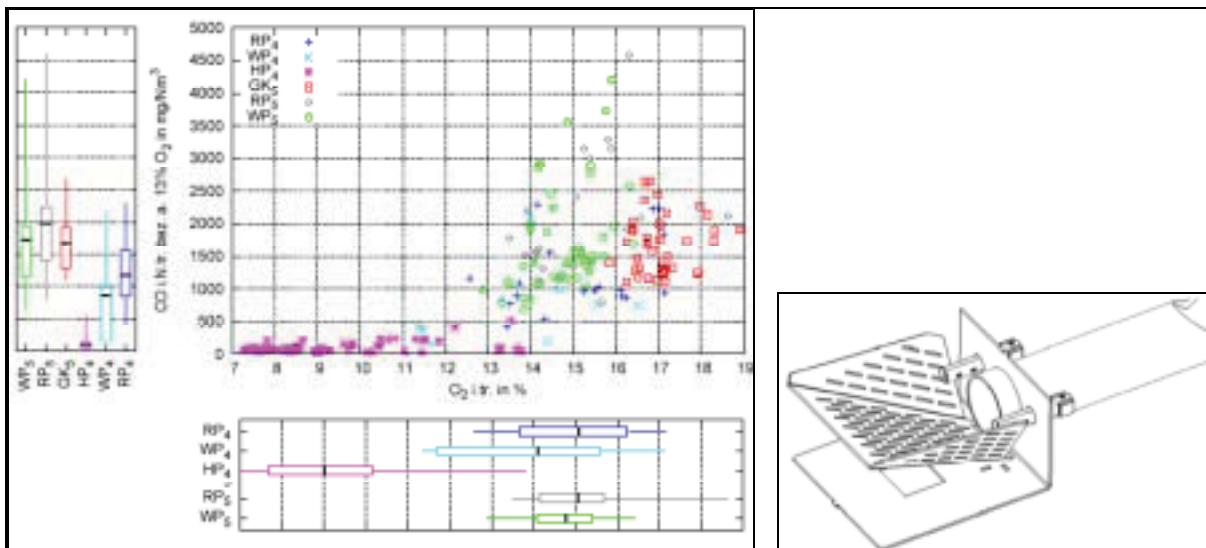


Abbildung 143: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen beim Einsatz von Holzpellets (HP) bzw. Referenzbrennstoffen WWSP (WP), WRSP (RP) und WG (GK) für den Registerkessel; Erhebung von Technikumsdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13% Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

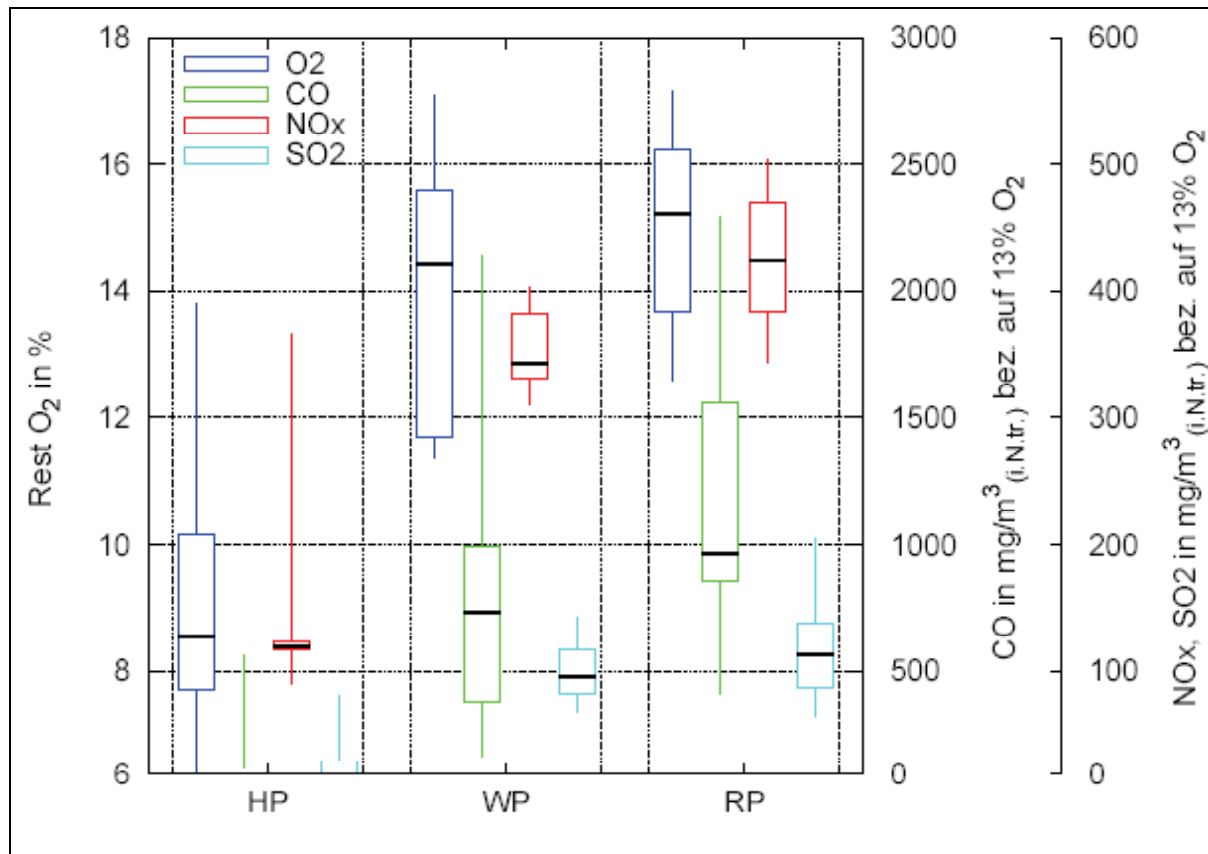


Abbildung 144: Vergleich der Emissionskonzentrationen beim Einsatz von Holzpellets (HP) bzw. Referenzbrennstoffen WWSP (WP) und WRSP (RP) für den Registerkessel; Erhebung von Technikumsdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13% Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Generell muss festgestellt werden, dass die Leistung der Anlage beim Einsatz von halmgutartigen Biobrennstoffen gegenüber Holzpellets deutlich reduziert ist und das aufgrund der niedrigen Aschererweichungstemperaturen eine kontinuierliche Glutbettdurchmischung sowie eine mechanische Ascheaustragung notwendig ist. In Verbindung mit Sekundärmaßnahmen (Prall- und Umlenkbleche) sowie einer gesondert gesteuerten Sekundärluftzuführung wird die Einhaltung der Grenzwerte (4,0 g/Nm³ CO; 0,15 g/Nm³ Staub bei 13 % Vol. O₂) als erreichbar angesehen.

4.3 Wilhelm-Klauditz-Institut Braunschweig (WKI) (FKZ 22018103) [/15/]

Prototypenentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW

Ziel des Projektes war, innerhalb von drei Projektphasen die Grundlage für die Entwicklung eines Feuerungsprototyps mit einer Leistung < 1 MW zu schaffen. Dazu wurden in der ersten Phase Feldmessungen in Dänemark und Schweden durchgeführt und daraus ableitend eine 50 kW Feuerung der Firma Agriserve im Technikum des WKI installiert. Diese sollte zur Optimierung des Ausbrandes primärseitig so verbessert werden, dass eine Genehmigungsfähigkeit erreicht werden könnte. Die zweite Projektphase beinhaltete die Entwicklung und Erprobung einer Sekundärmaßnahme zur effektiven Entstaubung. Diese sollte an der in Projektphase eins optimierten Feuerungsanlage erprobt werden. Projektphase drei beinhaltete die Entwicklung eines Feuerungs- und ggf. Abgasreinigungsprototypen für die Leistungsklasse unter 1 MW.

Ergebnisse der Phase 1

Die Erprobung der als „halmguttauglich“ ausgewiesenen Feuerungsanlage zeigte z.T. die Untauglichkeit für halmgutartige Brennstoffe mit niedrigen Ascheschmelzpunkt. Die Bemühungen zur Verbesserung des Brenners (Modifikationen s. Abb. 145) waren hinsichtlich des Einsatzes von Halmgütern nur in Verbindung mit einer regelmäßigen manuellen Ascheberäumung teilweise erfolgreich.

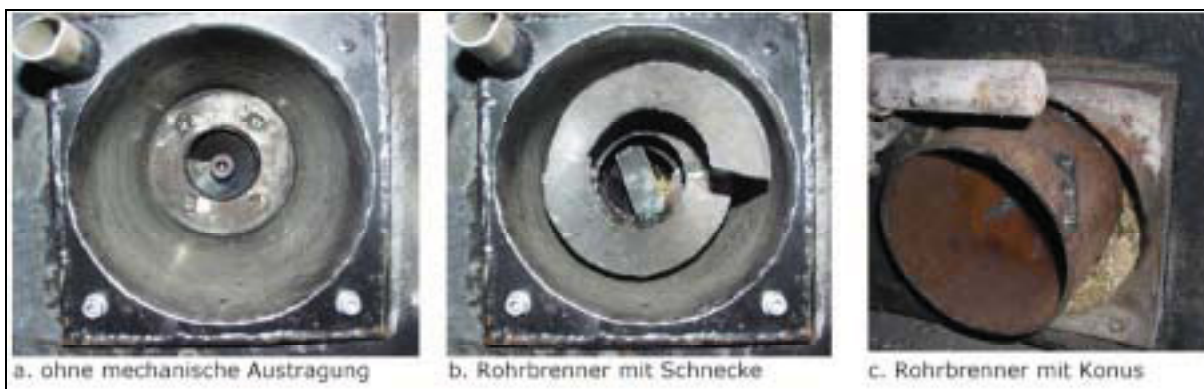


Abbildung 145: Entwicklungsstufen des entwickelten „Rohrbrenners“

So konnten hier beim Einsatz von Getreide und Holzpellets in prinzipiellen Tests Kohlenmonoxidemissionen $< 50 \text{ mg/m}^3$ nachgewiesen werden (s. Abb. 146). Für Strohpellets lagen diese Emissionsniveaus etwas höher.

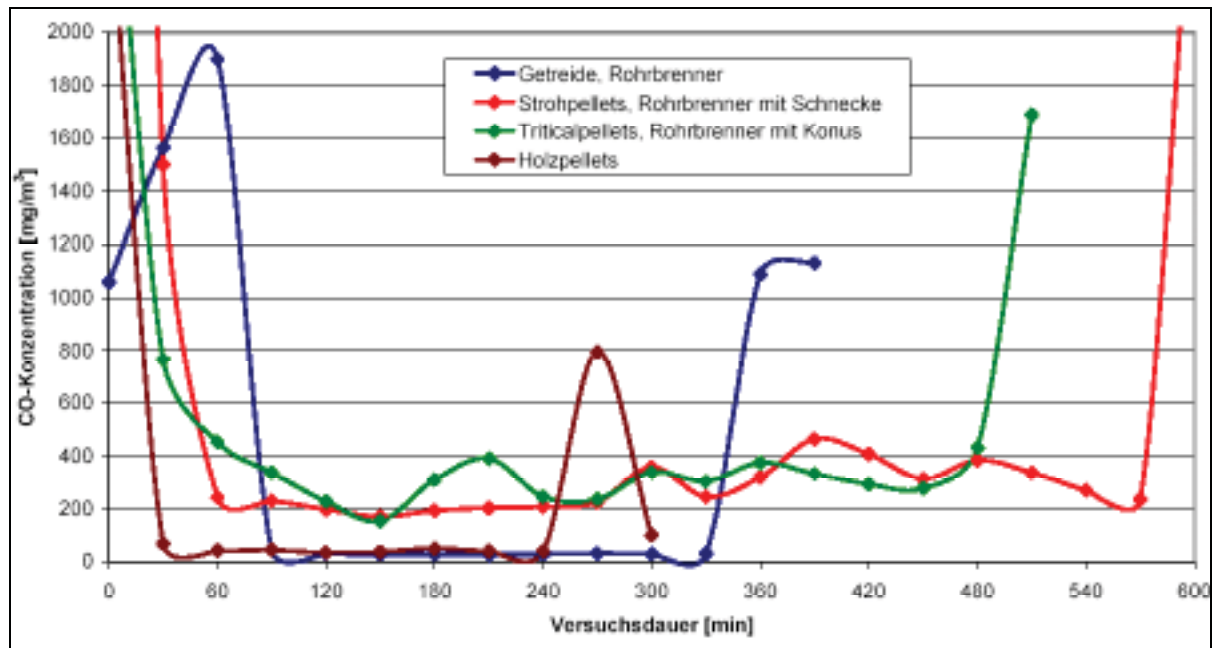


Abbildung 146: Vergleich der Entwicklungen der CO-Konzentrationen verschiedener Biomassen

Allerdings ist eine mit fortgeschrittener Versuchsdauer zunehmende Verschlackung beim Einsatz von Halmgütern erkennbar, welche einen automatischen kontinuierlichen Betrieb ausschließt (s. Abb. 147).



Abbildung 147: Vergleich verschiedener Halmgutaschen

Die Staubmessungen ergaben für die Getreideverbrennung 560 mg/m^3 , beim Einsatz von Strohpellets 600 mg/m^3 und bei Holzpellets 165 mg/m^3 . Damit lagen alle Brennstoffe oberhalb der gegenwärtigen Anforderungen der 1. BlmSchV (150 mg/m^3) und es ist somit die kombinierte Etablierung eines Abscheidesystems vorzusehen.

Ergebnisse der Phase 2

Die Entwicklung und Erprobung eines Staubabscheidesystems oblag im Rahmen eines Unterauftrages der Firma Lehmann Maschinenbau GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft und Kältetechnik (ILK). Als Ziel wurde eine modulare Elektro-Filterkonzeption mit einfachem, robusten Aufbau formuliert. Der von der Firma Lehmann gefertigte Elektrofilter (s. Abb. 148) wurde im Technikum des ILK an einer 120 kW Schubrostfeuerung

der Firma WVT (Bioflamm) mit dem Referenzbrennstoff der TLL Winterweizenstrohpellets (WWSP) erprobt (s. Abb. 149).



Abbildung 148: Filterprototyp mit drehenden Scheiben (links) bzw. mit Sprühelektroden (rechts)

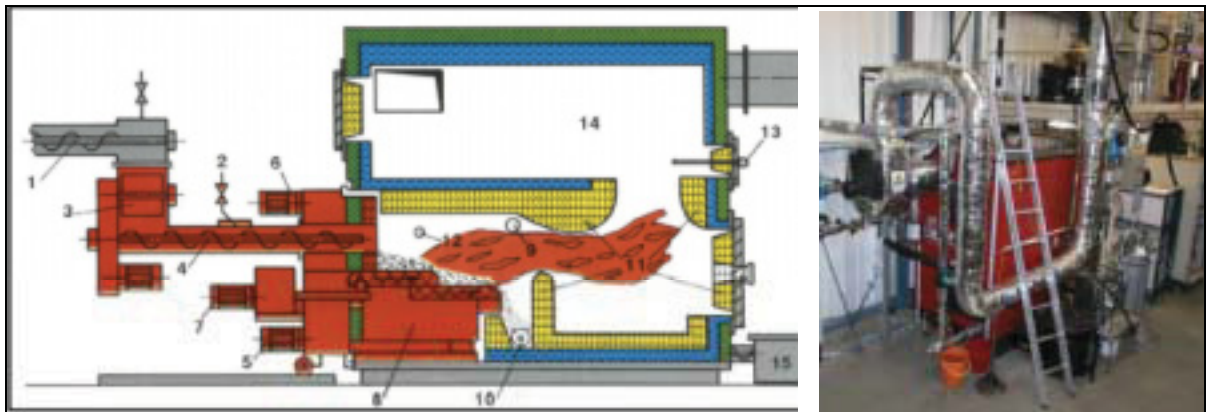


Abbildung 149: Schubrostfeuerung der Firma WVT-Bioflamm (links Schema) und auf dem ILK Prüfstand (rechts)

Dabei konnten bei Rohgasstaubkonzentrationen von ca. 200 mg/m³ durch den Einsatz des Elektrofilters, mit festgestellten 21,5 mg/m³ Reingasstaubkonzentrationen, Abscheideraten von fast 90 % nachgewiesen werden. Abbildung 150 verdeutlicht dabei eine gute Abscheidung von Partikeln mit einem Durchmesser bis etwa 2 µm. Des Weiteren konnte eine Verschiebung der Partikelgröße von 0,1 auf 0,3 µm erreicht werden (s. Abb. 150). Feinste Partikel haben sich durch elektrische Beeinflussung zu Agglomeraten zusammen geschlossen. Die agglomerierten Russpartikel, welche auf den Niederschlagselektroden abgeschieden wurden, konnten durch Abstreiferbürsten leicht abgereinigt werden. Der Staub sammelte sich dabei auf dem Abscheiderboden. Der Elektrofilter ist somit für eine kontinuierliche Betriebsweise geeignet.

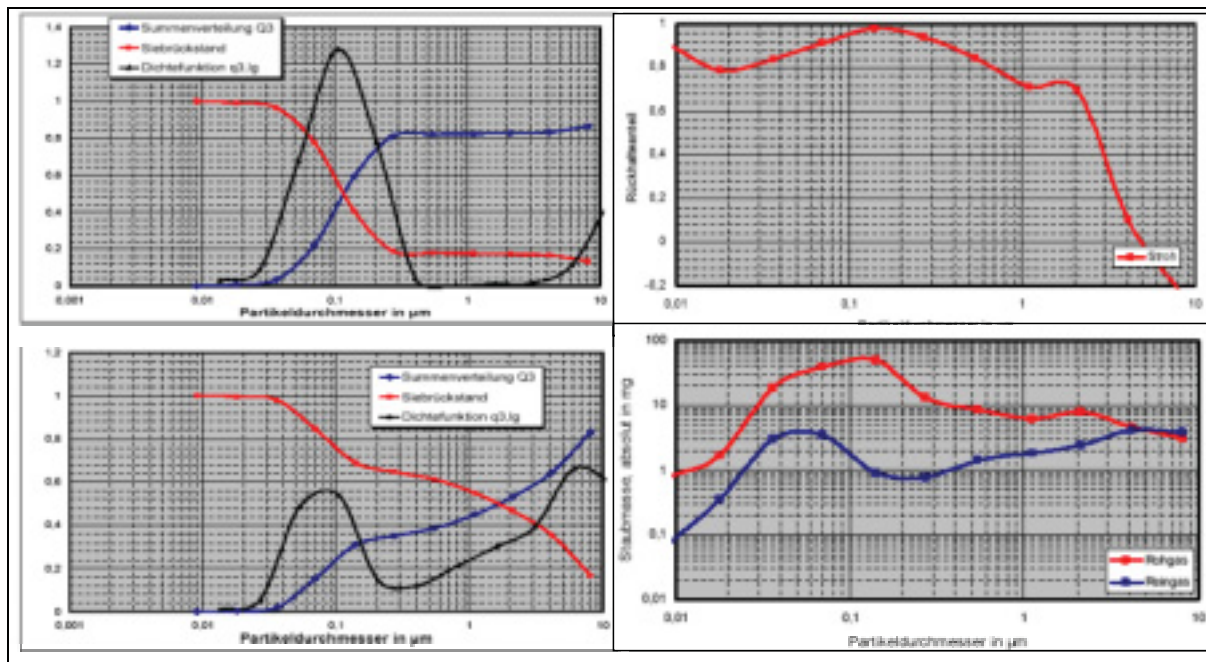


Abbildung 150: Partikelgrößenverteilung im Rohgas (links oben), im Reingas (links unten), Anteil der zurückgehaltenen Partikel bezogen auf den Partikeldurchmesser (rechts oben) und ermittelte Staubmasse im Impaktor nach 900 s im Normzustand trocken (rechts unten)

Die Prüfung des Elektrofilters an der in Projektphase 1 untersuchten Feuerung war aufgrund des Rücktritts des Herstellers des ursprünglich zur Untersuchung vorgesehenen Kessels und den damit einhergehenden zeitlichen Verzögerungen bei der Suche nach neuen Projektpartnern nicht möglich.

Ergebnisse der Phase 3

Das Ziel der Phase drei einen neuen Feuerungstyp zu entwickeln, konnte nicht erreicht werden. Es wurden stattdessen Untersuchungen zum Stand der Technik an zwei Feuerungsanlagen vorgenommen. Es handelte sich hierbei um eine 25 kW Unterschubfeuerung der Firma Agromechanika (Brenner Typ LING 25 der Firma LING Krnov) sowie einen 55 kW Seiteneinschubbrenner der Firma Agriserve (Hamech-Kessel KWH-55). Die Ergebnisse für die untersuchten Weizenstrohpellets der Firma Kaliro zeigten für den Agromechanika Kessel mit LING Brenner Probleme bei der Brennstoffzuführung und des Ascheaustrages. Eine Modifizierung von Bauteilen wurde vorgeschlagen, konnte jedoch nicht geprüft werden. Für den zweiten Kessel/Brenner der Firma Hamech/Agriserve konnte im Kurzzeitversuch die prinzipielle Einhaltung der gegenwärtigen Anforderungen ($4,0 \text{ g/Nm}^3 \text{ CO}$) nachgewiesen werden. Der Nachweis der Einhaltung höherer Anforderungen und eines störungsfreien Dauerbetriebes konnte nicht erbracht werden.

4.4 atz Entwicklungszentrum Sulzbach Rosenberg (atz) (FKZ 22019303) [/16/]

Kleinf Feuerungsanlage für Getreide und Stroh

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer neuen Feuerungs- und Abgasreinigungstechnik für den Leistungsbereich kleiner 50 kW für halmgutartige Brennstoffe. Die Untersuchungen erstreckten sich über zwei neu entwickelte Feuerungssysteme sowie zwei verschiedene Abgasreinigungstechniken (Schütttschichtfilter und Alpha-Filter) bis zu Untersuchungen zum Korrosionsverhalten verschiedener Materialien. Als Kooperationspartner wurden die Firma Fritz Grimm GmbH Co. KG, Firma Herding Filtertechnik und die Fachhochschule (FH) Amberg-Weiden im Projekt implementiert.

Beim ersten Feuerungssystem handelt es sich um einen vierstufigen Rost mit separatem Ascheschieber je Roststufe. Es wurde bei der Konzipierung auf klare Luftstufungs- und Durchmischungsmöglichkeiten sowie die Möglichkeit der Optimierung entsprechender Verweilzeiten in verschiedenen Reaktionsbereichen geachtet (s. Abb. 151).

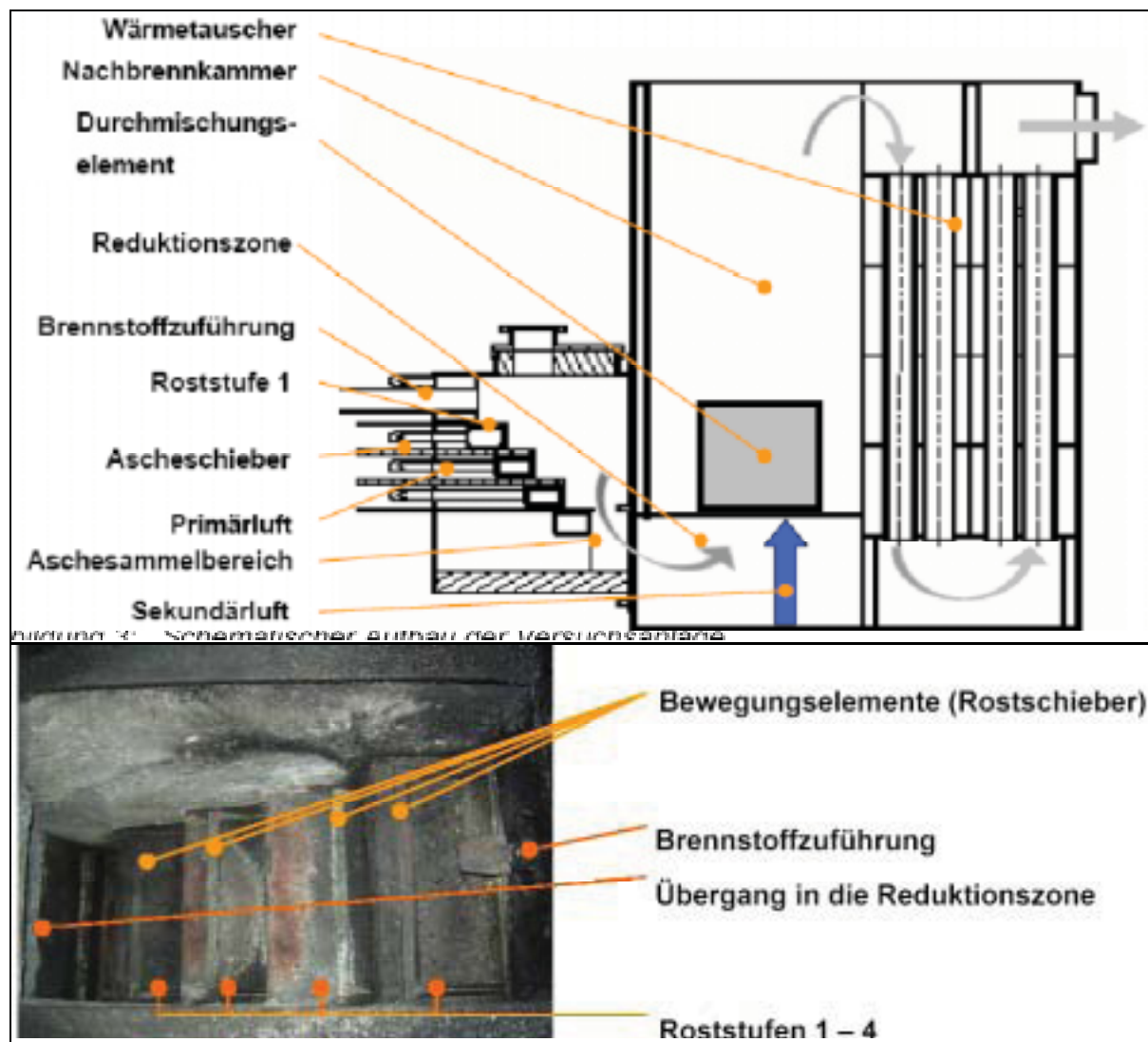


Abbildung 151: Schema der Rostfeuerung des atz (oben) und Blick auf Roststufen und separate Bewegungselemente (unten)

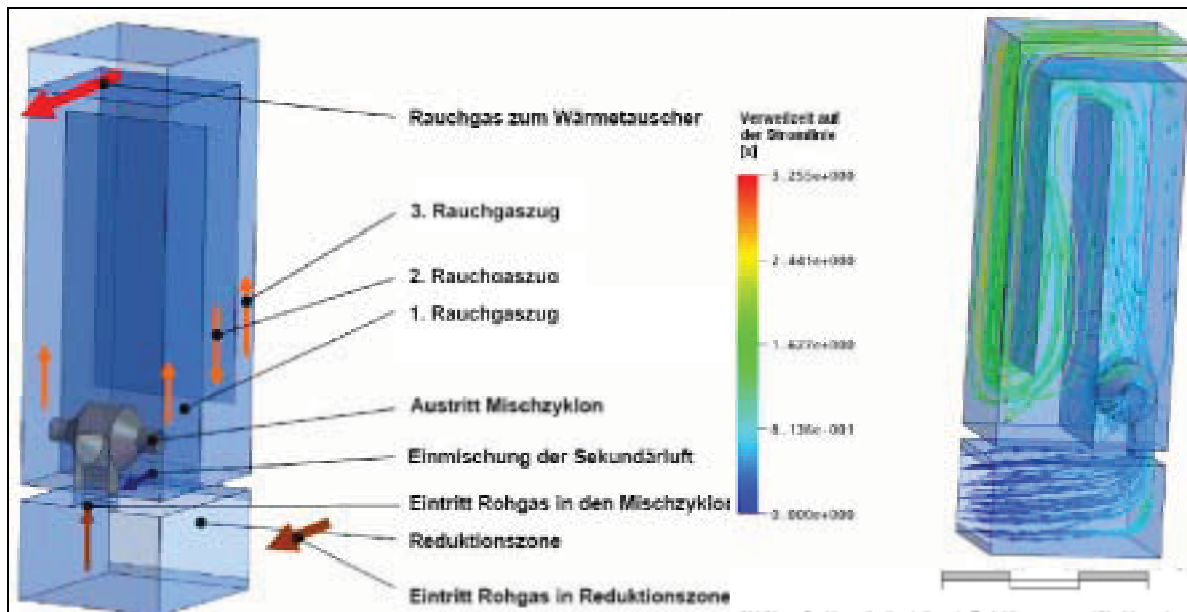


Abbildung 152: Schematischer Aufbau (links) und Darstellung der numerischen Simulation der Verweilzeiten der Nachbrennkammer (rechts)

Der aus hitzebeständigem Edelstahl etablierte Mischzyklon (s. Abb. 152) wurde konstruktiv vereinfacht und in die mit Feuerfestmaterial isolierte Nachbrennkammer der Feuerung eingebaut. Die Abkühlung der Rauchgase erfolgte über einen mit spiralförmigen Reinigungselementen ausgerüsteten Rauchrohrwärmetauscher (s. Abb. 153). Zur Staubabscheidung wurde im Zusammenhang mit diesem Feuerungssystem ein Schütttschichtfilter des atz (s. Abb. 156, links) untersucht.



Abbildung 153: Nachbrennkammer mit installiertem Mischzyklon (links) und Rauchrohrwärmetauscher mit Abreinigungsspiralen (rechts)

Das zweite Feuerungssystem wurde als Vorschubrostsystem mit acht beweglichen Rostelementen ausgelegt (s. Abb. 154). Eine Nachbrennkammer mit VB-Brenner¹ als Durchmischungselement (s. Abb. 155) sowie eine Staubabscheidung mittels eines ALPHA-Filters der Firma Herding GmbH-Filtertechnik ergänzten dieses Feuerungskonzept (s. Abb. 156, rechts).

¹ Vortex-Breakdown-Prinzip – Prinzip des zusammenbrechenden Wirbels

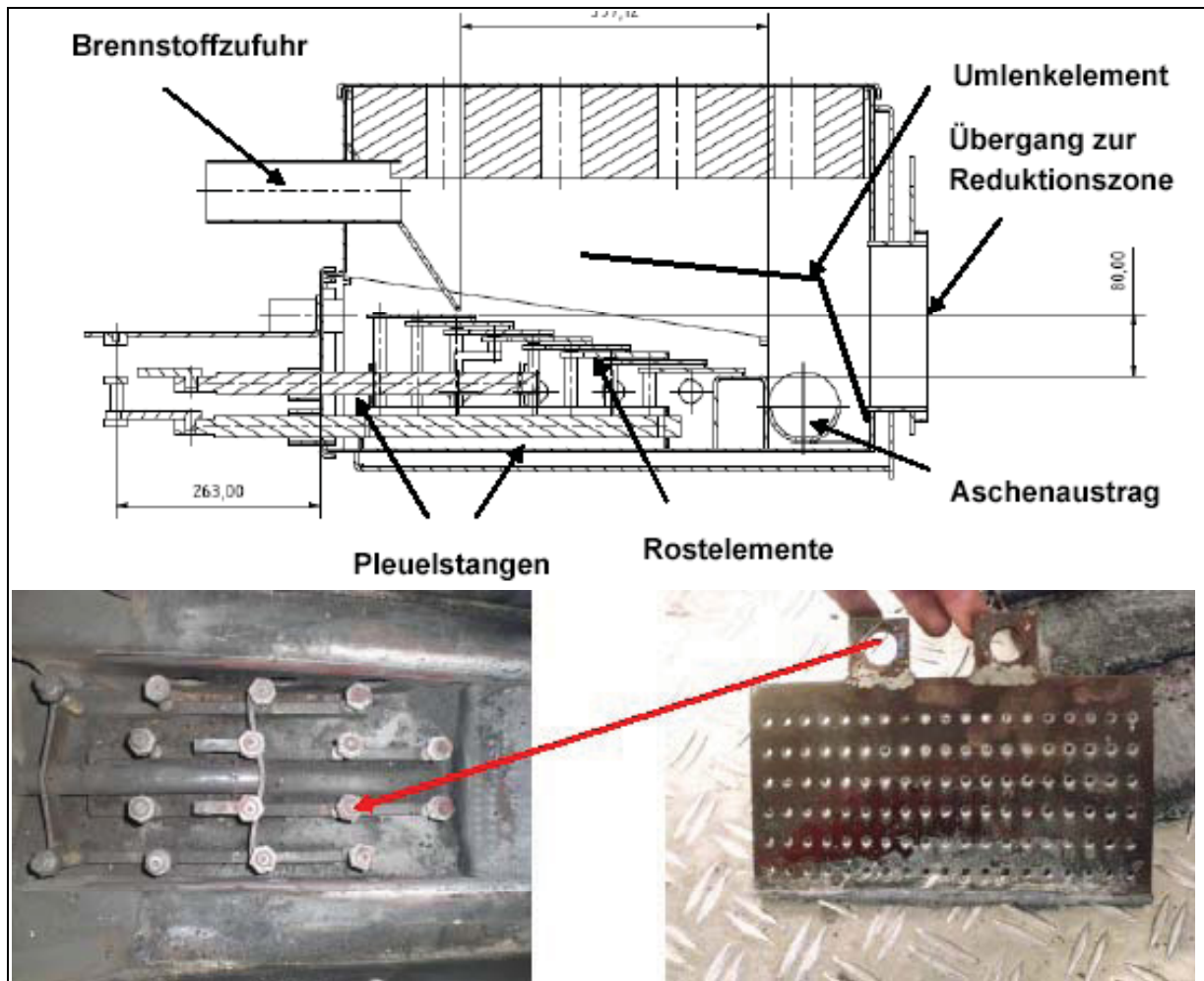


Abbildung 154: Schema der Vorschubrostfeuerung des atz (oben) und Blick auf den Antrieb der Rostelemente (unten links) sowie ein Rostelement (unten rechts)



Abbildung 155: Feuerungsraum mit Umlenkelement (links) und eingebauter VB Brenner (rechts)

Beim untersuchten Schüttschichtfilter wurden verschiedene Schüttungen, Körnungen sowie Schüttungshöhen getestet (s. Abb. 156, links). Er ist im Gegensatz zum im Anlagenbetrieb automatisiert zu reinigenden ALPHA-Filter periodisch zu reinigen. Der Alpha Filter wird durch Jet-Impulse mittels Druckluft entgegen der Rauchgasströmungsrichtung in die 16 zylindrischen Filterelemente aus feuerfesten Werkstoffen auf Ton- und Glasbasis gereinigt (s. Abb. 156, rechts).

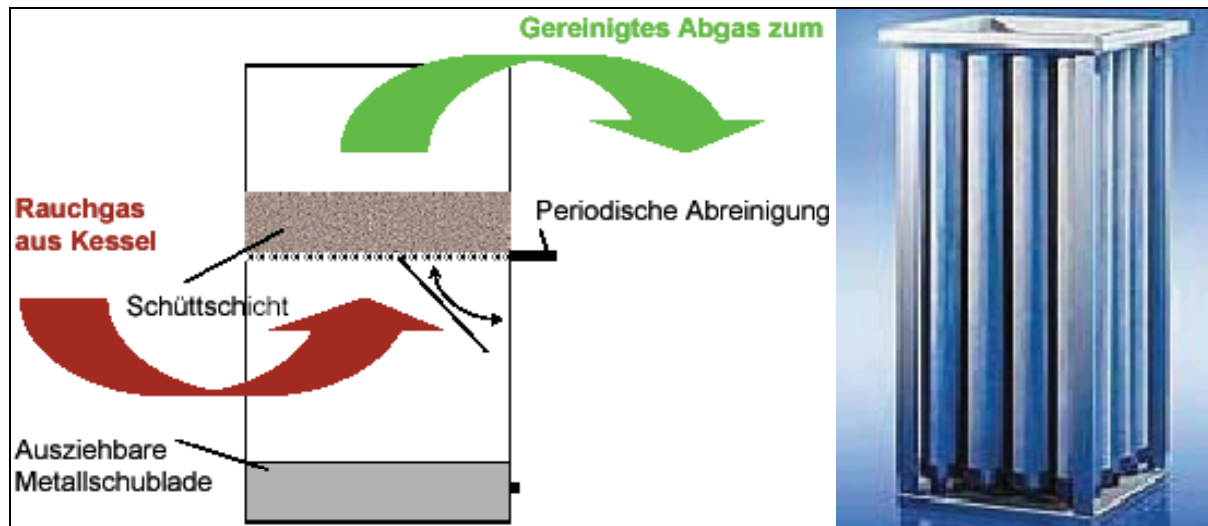


Abbildung 156: Schema des Schütttschichtfilters (links) und Filter-Cluster des ALPHA-Filters (rechts)

Um bei der Verbrennung von Halmgütern auftretende Korrosionen genauer zu untersuchen, wurden sechs Korrosionssonden unterschiedlicher Materialien sowie verschiedene Beschichtungen bzw. Beschichtungsverfahren geprüft. Abbildung 157 zeigt am Übergang zwischen Nachbrennkammer und Rauchrohrkessel eingebaute Korrosionssonden.

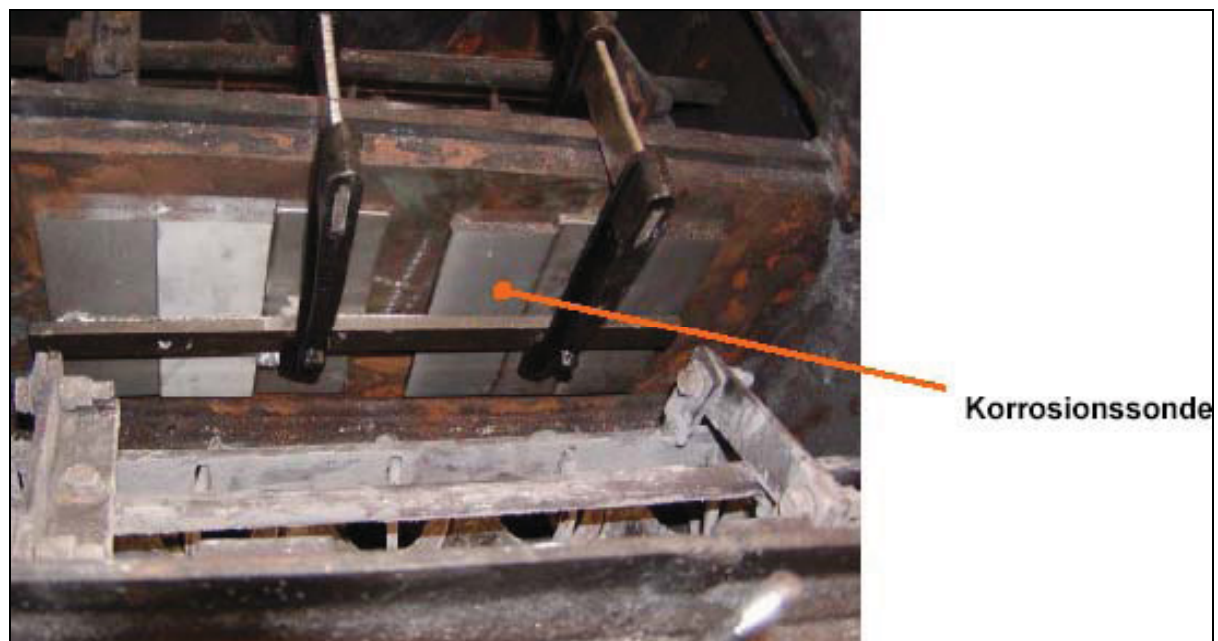


Abbildung 157: Im Wärmetauscher eingebaute Korrosionssonden

Ergebnisse

Hinsichtlich der Sicherung eines störungsfreien Betriebes wurde festgestellt, dass Körner zu einer starken Brennstoffversinterung neigten, jedoch kaum zu Verschlackungen der entstehenden Aschen. Strohaschen verschlackten dagegen stark und beeinflussten den Betrieb der Anlage negativ (s. Abb. 158). Versinterungen des Strohens wurden nicht beobachtet. Während die Getreideversinterung durch abgestimmt eingesetzte Bewegungselemente im Rostbereich vermieden werden konnte, ist eine Kühlung

entsprechender Feuerraumoberflächen notwendig, um Strohschlackeanbackungen zu reduzieren.



Abbildung 158: Blick in den Feuerraum nach Verbrennung von Wintergerstenkörner (WG RB) (links) und Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) (rechts)

Die Ergebnisse der Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen zeigen, dass neben dem Nachweis der Genehmigungsfähigkeit für die gegenwärtigen als auch die während des Zeitraumes der Projektbearbeitung immer höheren Anforderungen, im Rahmen von Ausnahmeregelungen in einzelnen Bundesländern als auch im Novellierungsvorschlag für die 1. BImSchV, erfüllt werden können (s. Abb. 159 bis 165). Dies konnte im Wesentlichen durch eine quasi kontinuierliche Bewegung sowie durch eine spezielle konstruktive Gestaltung der Rostelemente erreicht werden. Dabei führt eine nur leichte Bewegung des Glutbettes nicht zum Aufbrechen desselben. Des Weiteren werden durch die etablierten Durchmischungselemente die Rauchgase ausreichend mit Sekundärluft verwirbelt, um den Ausbrand weiter zu verbessern. Durch die Weiterentwicklung des Stufenrostsystems zum Vorschubrostsystems mit VB-Brenner konnten weitere Senkungen sowohl der CO- als auch der NO_x-Emissionen erreicht werden.

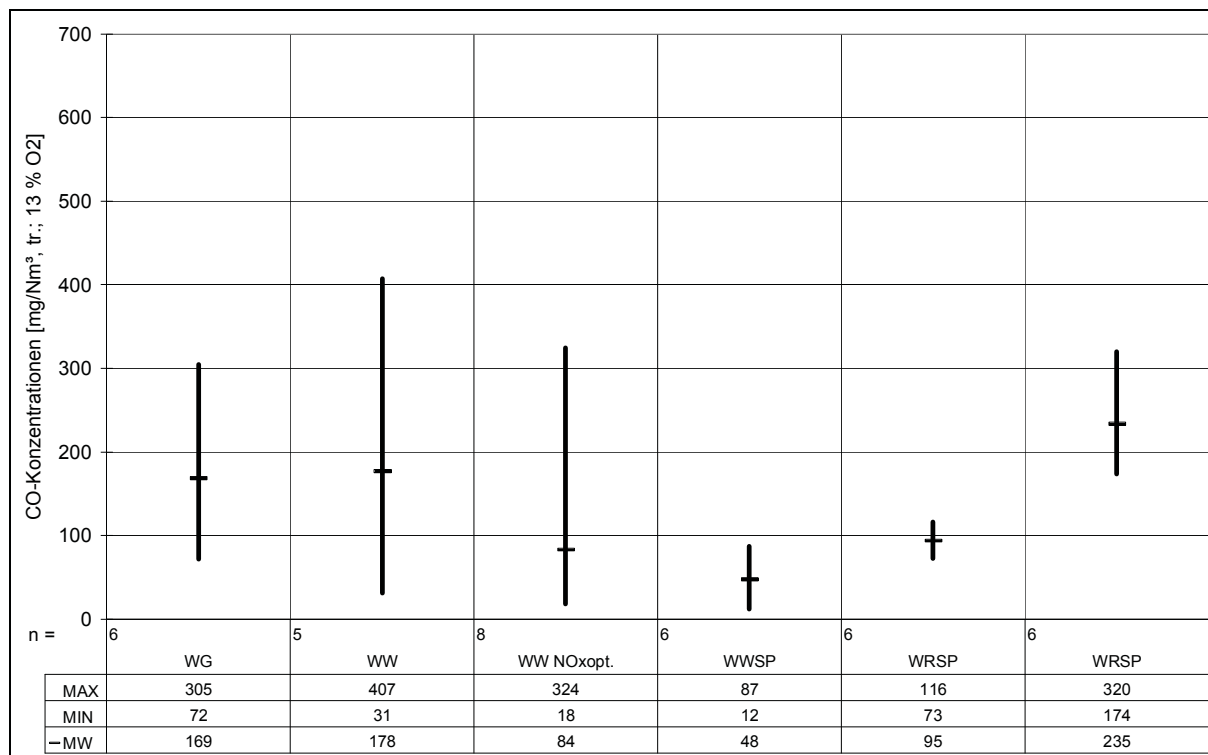


Abbildung 159: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des ersten Anlagenkonzeptes – Stufenrost mit Mischzyklon – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

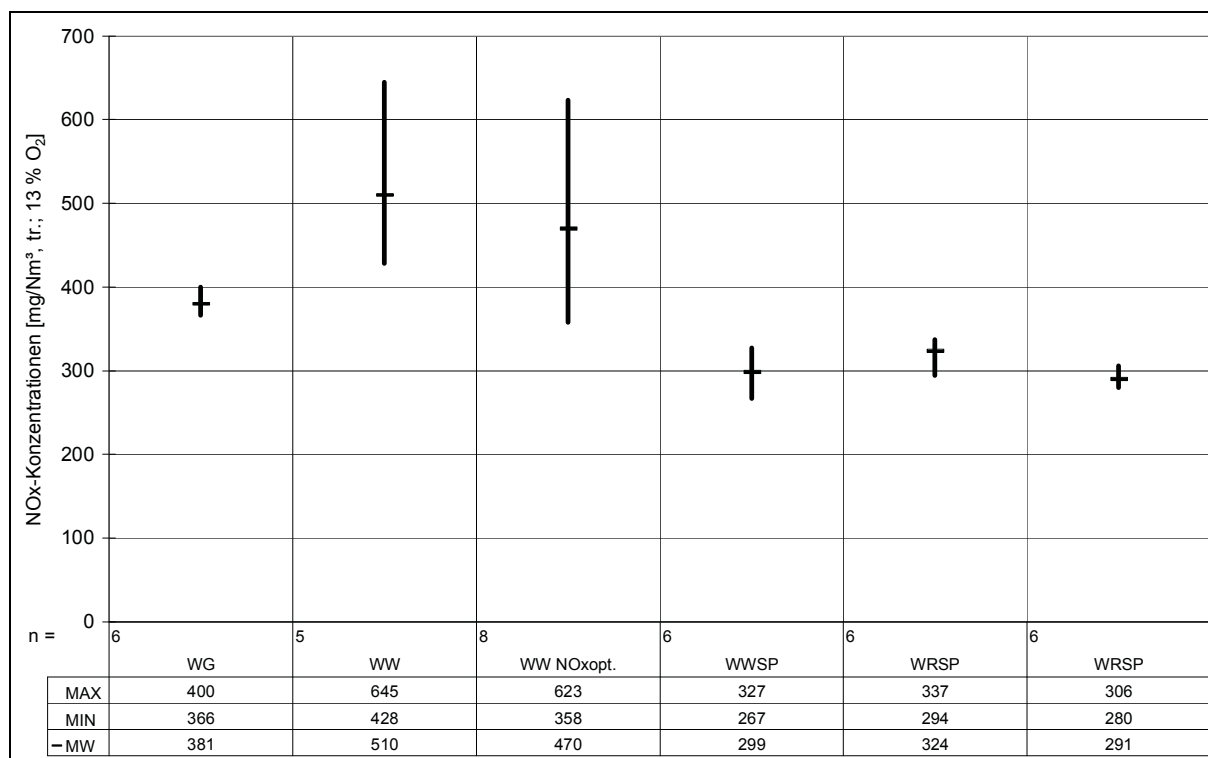


Abbildung 160: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des ersten Anlagenkonzeptes – Stufenrost mit Mischzyklon – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

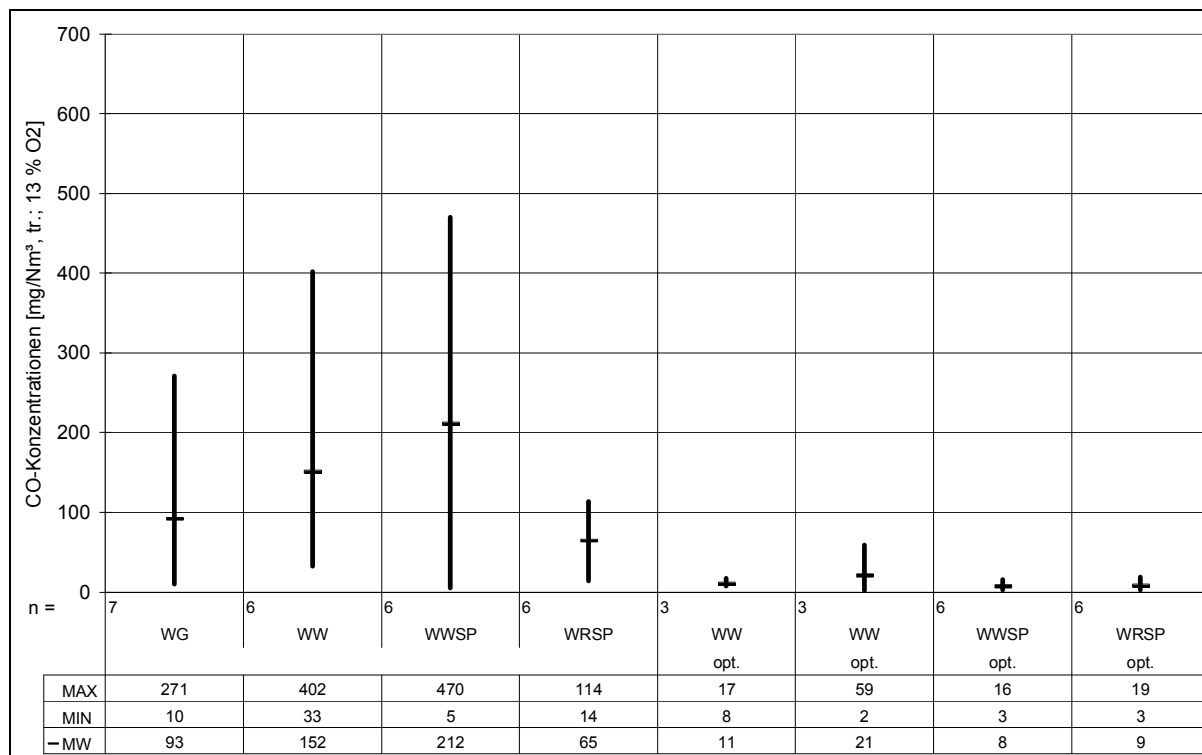


Abbildung 161: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des zweiten Anlagenkonzeptes – Vorschubrost mit VB-Brenner – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

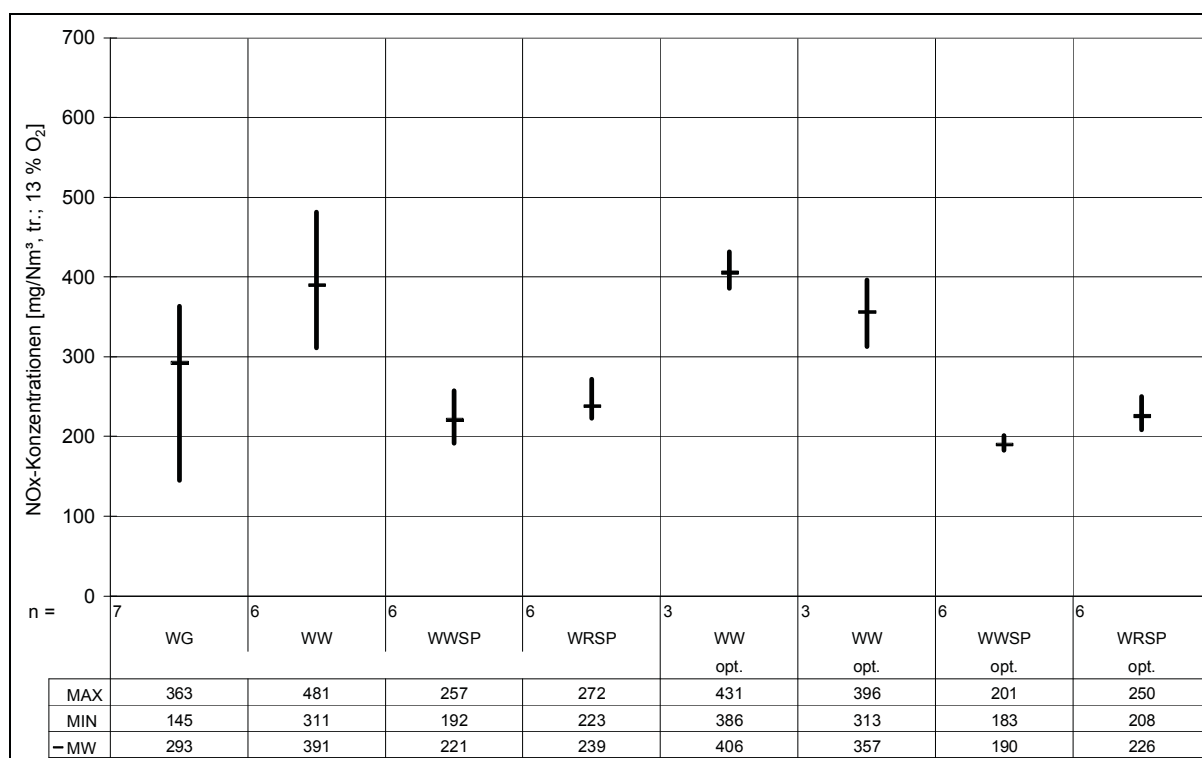


Abbildung 162: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des zweiten Anlagenkonzeptes – Vorschubrost mit VB-Brenner – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die Ergebnisse der Staubmessungen verdeutlichen, dass allein durch die Neukonstruktion des Rostsystems sowie des Durchmischungselementes eine Absenkung der Rohgasgehalte erreicht wurde (vgl. Abb. 163 bis 165). Eine Ausnahme bildet lediglich WWSP, welche nur sehr geringe Rohgasstaubkonzentrationen aufweisen. Es wird damit jedoch deutlich, dass bei geeigneter Brennstoffauswahl die gestellten Anforderungen der gegenwärtigen 1. BImSchV ($0,15 \text{ g/Nm}^3$) einhaltbar sind. Deutlich höhere Anforderungen bzw. der Einsatz einer größeren Brennstoffvariabilität in Bezug auf Halmgüter verlangen entsprechend geeignete Sekundärmaßnahmen.

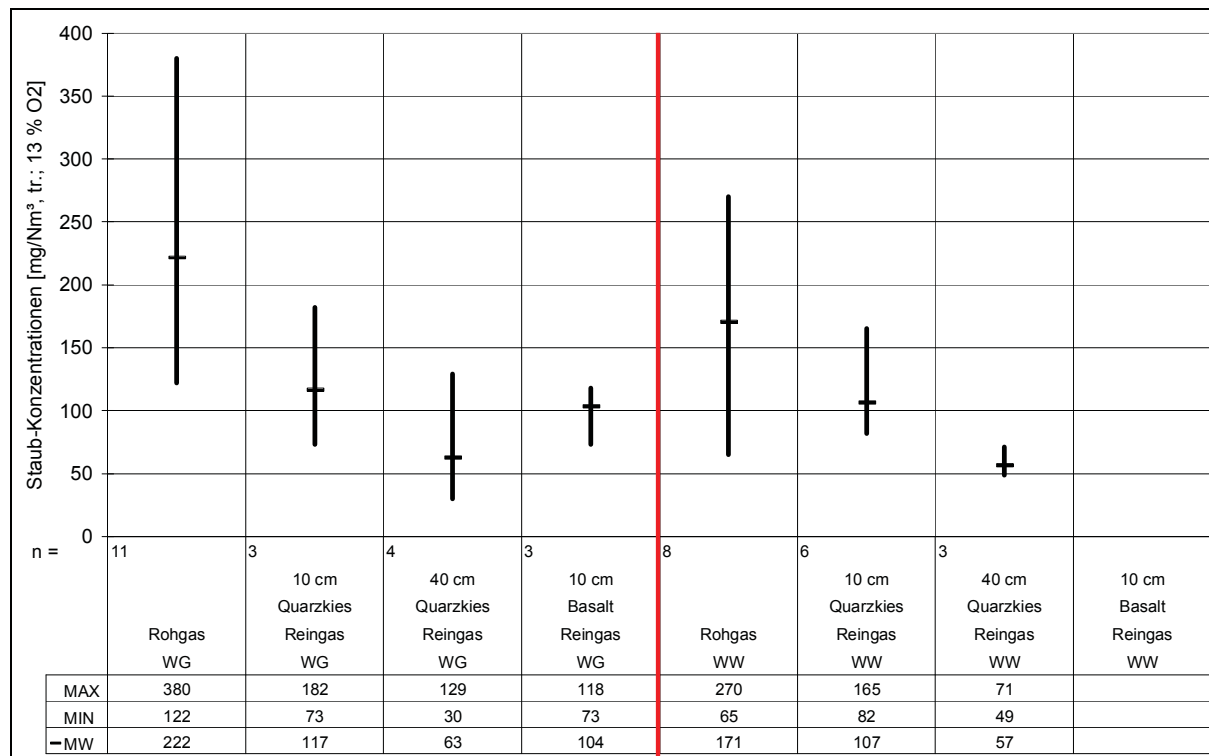


Abbildung 163: Vergleich der Staubkonzentrationen für WG und WW am Stufenrost mit Mischzyklon und Schüttstichtfilter in Abhängigkeit der Schüttung und der Schütthöhe; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die Ergebnisse für die eingesetzten Filtersysteme zeigten für alle eingesetzten Referenzbrennstoffe positive Wirkungen in Bezug auf Staubminimierungen. Es zeigte sich im Fall des eingesetzten Schüttstichtfilters, dass die Körnung des Schüttbettmaterials keine signifikante Verbesserung der Abscheideleistung bewirkte, aber mit zunehmender Schütthöhe konnten beim Einsatz von Körnern weitere Reduktionspotentiale aufgezeigt werden, welche auch höheren Anforderungen gerecht werden (s. Abb. 163).

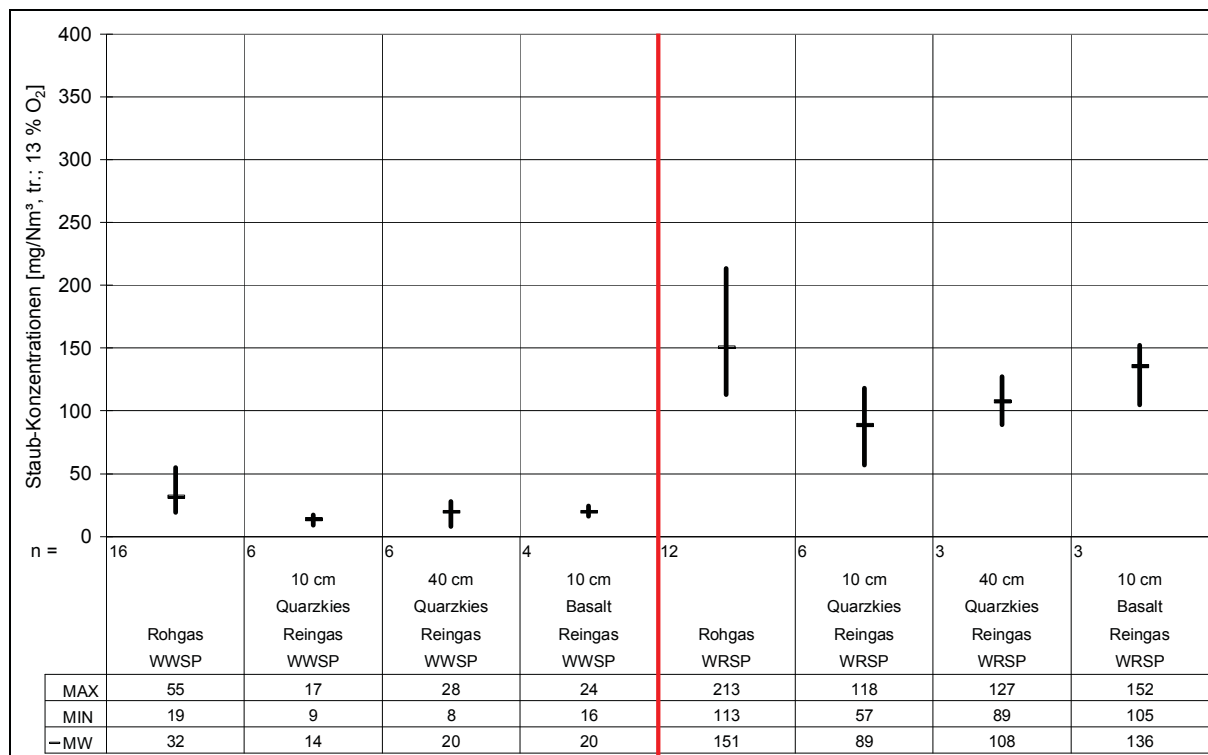


Abbildung 164: Vergleich der Staubkonzentrationen für WWSP und WRSP am Stufenrost mit Mischzyklon und Schütt-schichtfilter in Abhängigkeit der Schüttung und der Schütthöhe; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

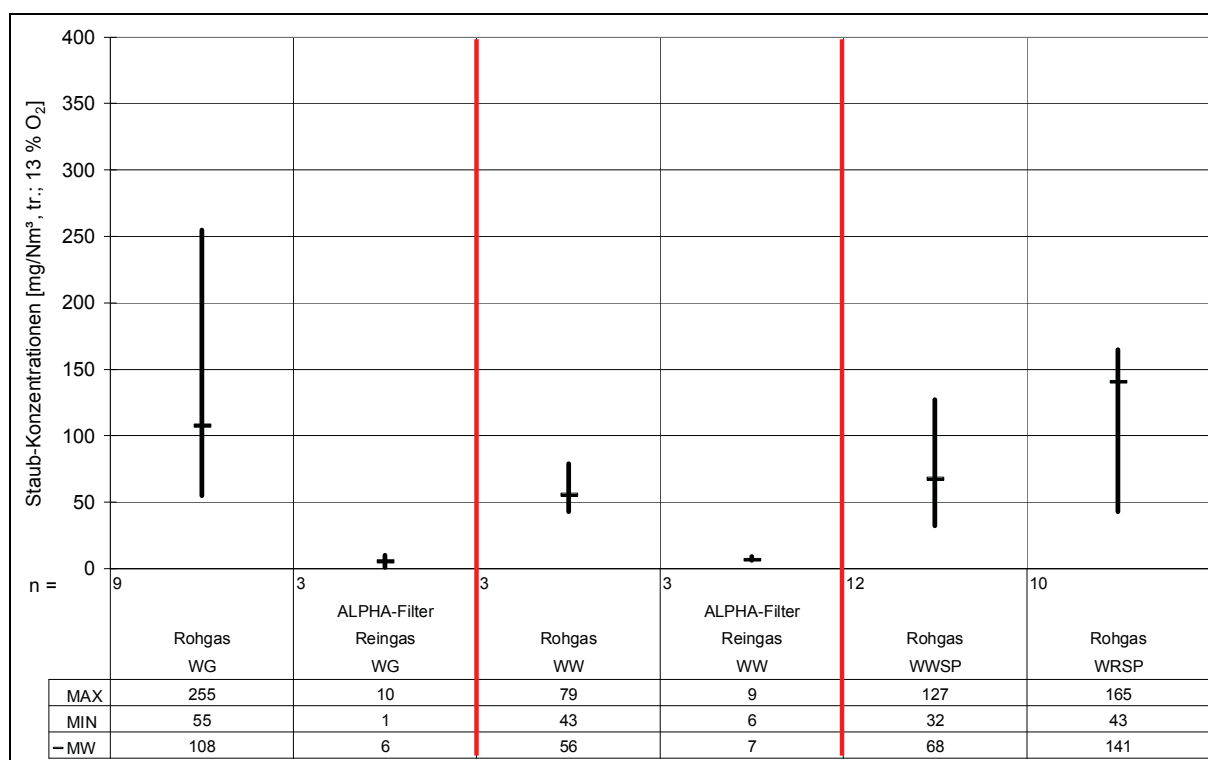


Abbildung 165: Vergleich der Staubkonzentrationen der Referenzbrennstoffe WG, WW, WWSP und WRSP am Vorschubrost mit VB-Brenner und ALPHA-Filter; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Die Untersuchungen des ALPHA-Filters zeigen noch deutlichere Staubminderungsmöglichkeiten für Getreidestäube als beim Einsatz des Schütttschichtfilters (s. Abb. 165). Eine Verbesserung des Betriebsverhaltens und eine Erhöhung der Standzeit kann durch das Aufbringen einer Precoatierung erreicht werden. Bei einem entsprechenden Nachweis im Langzeitbetrieb unter realen Bedingungen könnten selbst höhere Anforderungen bezüglich der Staubemissionen erreicht werden. Dieser steht aber noch aus. Der Einsatz bei der Verbrennung von Halmgutpellets konnte nicht erfolgen, da die Rauchgastemperaturen nach dem Wärmetauscher zu tief waren und die Gefahr der Rauchgaskondensation im Filter bestand, welche diesen unbrauchbar gemacht hätte.

Im Rahmen der Korrosionsuntersuchungen wurden über insgesamt 250 Betriebsstunden, mit sechs Korrosionssonden 35 Versuche durchgeführt, welche neben dem stationären Betrieb bei 500-600 °C (Stufenrost mit Mischzyklon) bzw. 900-1000 °C (Vorschubrost mit VB-Brenner) auch An- und Abfahrvorgänge enthielten. Von den untersuchten Werkstoffproben erwies sich der Edelstahl 1.4571 (V4A) als am besten für eine Kleinfeuerungsanlage für Getreide und Stroh geeignet.

4.5 Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) (FKZ 220 189 03) [/17/, /18/, /19/, /20/]

Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen

Ziel des Projektes war zunächst die Ermittlung des Standes der Technik an zwei am Markt erhältlichen speziellen Heizkesseln für Getreidebrennstoffe. Aufbauend auf den Ergebnissen der Messungen an Praxisanlagen sowie der Prüfstandsmessungen sollte des Weiteren eine Optimierung und Weiterentwicklung der Feuerungstechnik mit den Zielen:

1. Reduzierung des Wartungsaufwandes
2. Begrenzung der Partikelemission ($\sim 50 \text{ mg/Nm}^3$; 13 % Vol. O_2)
3. Minderung der NO_x -Emissionen ($\sim 500 \text{ mg/Nm}^3$; 13 % Vol. O_2)

durchgeführt werden (IVD). Da zu erwarten war, dass die Staubgrenzwerte nur schwer einhaltbar sein würden, sollte ein externer Staubabscheider (Edelstahl-Gewebefilter) modifiziert und angepasst werden. Die Ergebnisse der Optimierung der Feuerungsanlage sollten im Rahmen eines Langzeittests bzw. einer Abnahmemessung durch ein zugelassenes Prüfinstitut nachgewiesen werden.

Neben den Projektpartnern, dem Technologie- und Förderzentrum (TFZ), der Firma ESCUBE und der Firma Oskar Winkel wurden der Technologielieferant, die Firma Agroflam und das Prüfinstitut DEKRA (zugelassene Messstelle nach § 26 BImSchG) für die Durchführung der Abnahmemessung im Projekt implementiert.

Zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit von Feuerungsanlagen gehört neben der sicheren Einhaltung der Emissionsgrenzwerte ebenso der Nachweis eines stabilen und weitgehenden störungsfreien Betriebs.

Ergebnisse

Die im Rahmen der Praxistests durchgeführten Versuche zeigten für die Feuerung der Firma Passat Compact C 8 neben der nur bedingten Eignung für ausgewählte der geprüften halmgutartigen Brennstoffe sehr hohe Staubemissionen. Daher wurde an dieser Feuerungstechnologie der Versuchs-Edelstahl-Gewebefilter für einen Teilstrom des Abgases (ca. 50 % des Abgasvolumenstroms bei Nennwärmeleistung) untersucht (s. Abb. 166).



Abbildung 166: Aufbau des Edelstahl-Gewebefilters im Abgassystem der Passat Compact C8 Anlage (links) und Filterpatrone mit Edelstahlgewebe bei geöffneter Filterkammer (rechts)

Der externe Staubabscheider der Firma Oskar Winkel wurde erfolgreich modifiziert und bei allen Brennstoffen und Betriebszuständen durchgängig Staubkonzentrationen unter 10 mg/Nm³ (13 Vol. % O₂) gemessen. Dabei war ein problemloses Abreinigen der Filteroberflächen und somit ein zuverlässiger Dauerbetrieb für die Brennstoffe Getreideauszut, Strohpellets und Hafer über Druckluft in entsprechenden Zeitintervallen möglich. Beim Einsatz von Gerste oder Weizen ist das nur beim Zusatz von Branntkalk möglich. Eine elektrische Zusatzheizung in den Filterpatronen konnte eine Korrosion auf dem Edelstahl- und Stützgewebe zuverlässig verhindern [18/]. Die als Fazit des Projektes festgestellte generelle Praxistauglichkeit muss aber soweit relativiert werden, dass lediglich

für Getreideausputz ein längerer Betrieb (4 Monate) und eine problemlose Filterabreinigung festgestellt werden konnte. Andere eingesetzte Brennstoffe konnten entweder nicht lang genug geprüft (z.B. Weizenpellets), nicht im Dauerbetrieb verbrannt (Futterweizen) oder der Filter konnte nicht im Prozess abgereinigt werden. Nach Aussagen des Betreibers [53/] zeigten sich jedoch gravierende Filterabreinigungsprobleme nach ca. 1 Jahr, welche sich nach Einschätzung der Praktiker grundsätzlich auf die Konstruktion des Filters zurückführen lassen und welche nur nach grundlegenden Veränderungen auf Praxistauglichkeit geprüft werden könnten. Ähnliche Probleme zeigten sich beim Einsatz der selben Technologie an einem weiteren Feuerungssystem (Brennmuldenfeuerung der Firma Ökotherm Compact CO). Bei den hier eingesetzten Brennstoffen (Gerste, Weizen, Hafer und Roggenstrohpellets) waren die Ergebnisse sehr unterschiedlich (s. Abb. 167).



Abbildung 167: Oberflächen der Filterpatronen nach den Versuchen mit Gerste, Roggenstrohpellets, Hafer und Weizen (von links nach rechts)

Während die Abreinigung des Filters beim Einsatz von Gerste und Weizen auch bei erhöhtem Abreinigungsdruck nicht möglich war, ließ sich beim Einsatz von Hafer über 150 h eine gute Reinigungswirkung feststellen. Diese konnte auch bei den eingesetzten Strohpellets festgestellt werden, wobei es jedoch während der Brennstoffzuführung zu massiven Störungen kam und ein kontinuierlicher Betrieb des Gewebefilters somit nur für einen kurzen Zeitraum von 45 h gewährleistet war. Um die notwendige Abreinigung für Gerste und Weizen zu erreichen, wurden zusätzlich Versuche mit der Zugabe von Branntkalk (1,5 bzw. 3 % der Brennstoffmenge) durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Im Vergleich zu den nicht agglomerierten Staubpartikeln in sehr feinen Staubschichten beim Verbrennen ohne Zusatzstoffe bildeten sich unter Zugabe von Branntkalk dichte, poröse Filterkuchen, welche das Filterabreinigungsverhalten soweit verbesserten, dass ein störungsfreier Dauerbetrieb möglich war.

Für die zweite untersuchte Anlage (Agro 40 – Firma Agroflamm) konnten im Dauerbetrieb niedrige CO- ($< 50 \text{ mg/Nm}^3$) bzw. Cges- ($< 20 \text{ mg/Nm}^3$) Konzentrationen ermittelt werden. Selbst die gemessenen Staubemissionen waren mit $< 25 \text{ mg/Nm}^3$ sehr niedrig. Dagegen wurden für die NO_x-Konzentrationen mit knapp 1.000 mg/Nm^3 auffällig hohe Werte festgestellt. Daher sollte im Rahmen des Projektes diese Anlage besonders hinsichtlich der Optimierung dieses Parameters verbessert werden. Hierzu musste eine gestufte Verbrennung durch Veränderung der Luftführung und Verteilung realisiert werden. Dazu

wurden ein neuer Verbrennungsluftzylinder (Primärluft), eine bewegliche Sonde (Sekundärluft) sowie ein neuer Verbrennungslufttring für die Zufuhr der Nachverbrennungsluft etabliert (s. Abb. 168).



Abbildung 168: Neuer Verbrennungsluftzylinder und bewegliche Sonde für Sekundärluft (links) Sondenkopf (mitte) und Verbrennungslufttring zur Verteilung der Nachverbrennungsluft (rechts)

Beispielhaft für die Wirkung der Luftstufung auf die NO_x-Emissionsminderung verdeutlicht Abbildung 169 die 30 %-ige Reduzierung bei den Optimierungsversuchen am Agro 40.

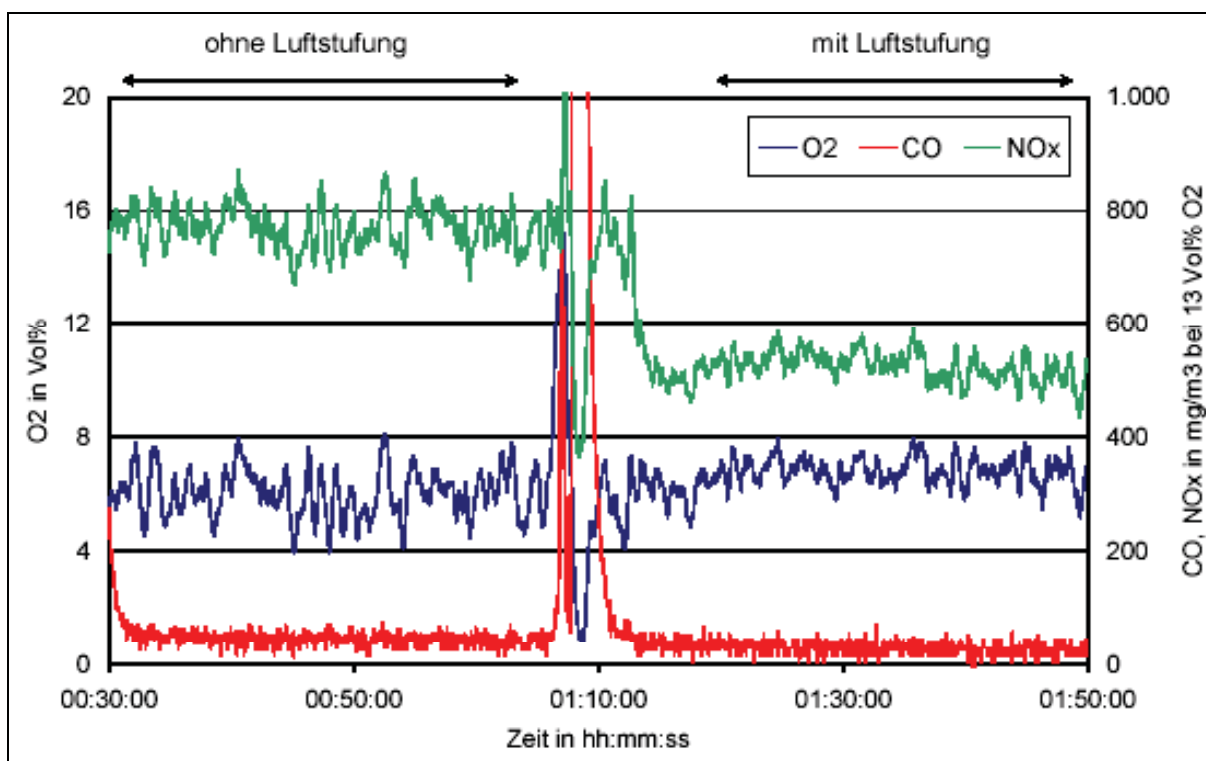


Abbildung 169: CO-, NO_x- und O₂ Konzentrationen im Abgas des Agro 40 beim Betrieb ohne und mit Luftstufung, Brennstoff: Gerste – WG

Der speziell für Halmgutbrennstoffe entwickelte Kessel der Firma Agroflam wurde im Rahmen des Projektes damit insofern weiter entwickelt, dass der Nachweis der Begrenzung der Partikelemissionen von weniger als 50 mg/Nm³ bzw. NO_x-Emissionen kleiner 500 mg/Nm³ (13 Vol. % O₂) unter Prüfstandsbedingungen erbracht werden konnte [18]. Durch

den Einsatz einer Drehzahlregelung für das Abgasgebläse in Verbindung mit einem CO/HC-Sensor (Typ CarboSen der Firma ESCUBE) konnte ein stabiler Dauerbetrieb mit hohem feuerungstechnischen Wirkungsgrad bei sehr geringen CO- und C_{ges} -Konzentrationen nachgewiesen werden [19/]. Die Adaption und Entwicklung sowie die Feststellung einer geeigneten Mess- und Einbauposition für einen entsprechenden Sensor resultierte in einem sensitiven Sensor vom Typ CarboSen 1.000 (s. Abb. 170). Dieses planare Sensorelement ist mehrschichtig aufgebaut und etwa so groß wie ein Streichholz.

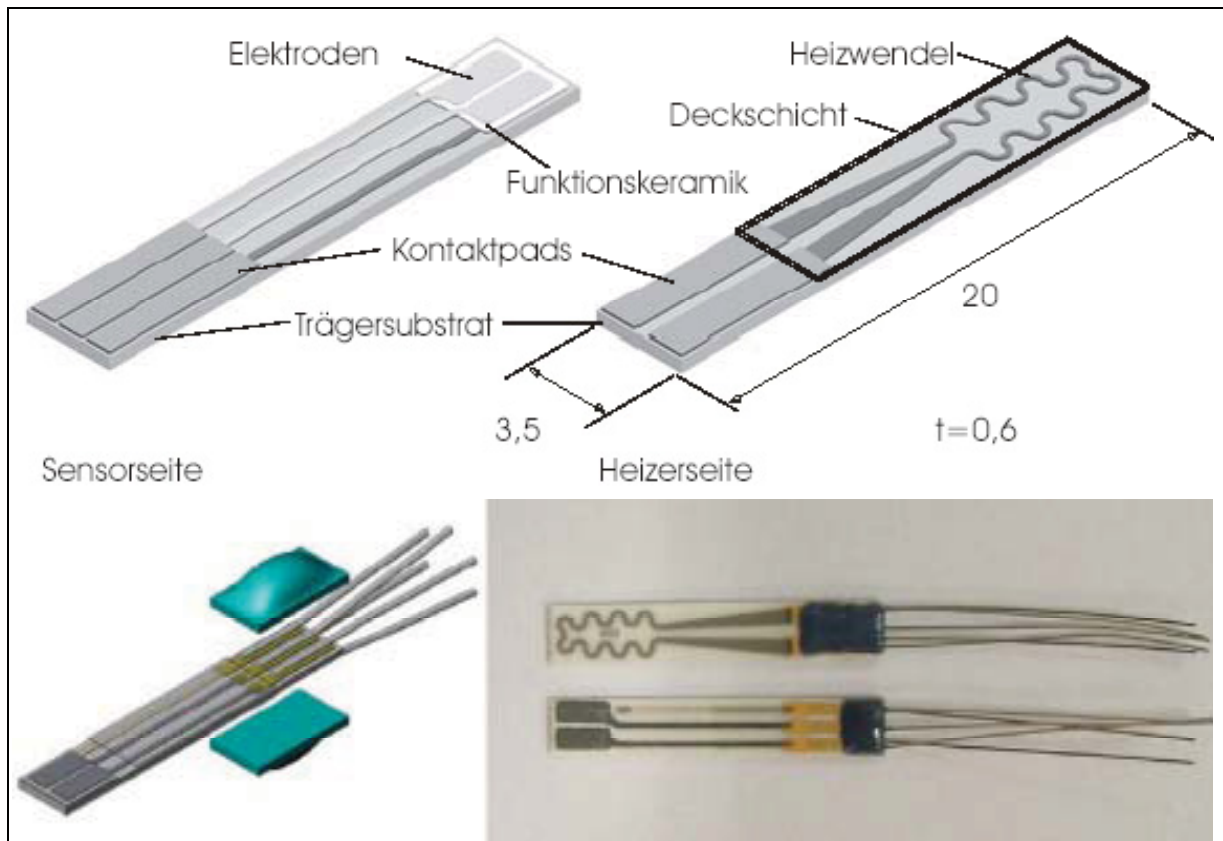


Abbildung 170: Aufbau des CarboSen Sensorelements (oben) mit 5 Drähten und Glasfixierung (unten). Dieser wurde in verschiedenen Tauchrohren spritzwasser- und partikelgeschützt hinter dem Sinterfilter platziert und getestet. Die Entwicklung des Tauchrohres aufgrund der Randbedingungen verdeutlicht Abbildung 171. Aufgrund sich verändernder Brennstoffqualitäten stellte sich die Kalibrierung der untersuchten Tauchsonde als schwierig dar. Dazu werden weitere Erprobungen und Anpassungen von alters- und drifftoleranten Optimierungsstrategien vorgeschlagen. Die generelle Funktionalität, Effektivität und Zuverlässigkeit der Regelstrategie konnte im Rahmen des Projektes nachgewiesen werden. Der Luftüberschuß der Anlage konnte von durchschnittlich 9 % im unregelmäßigen Fall bis auf 4 % O_2 , bei gleichzeitig minimierten CO- und NO_x-Emissionen, reduziert werden. Durch den Einsatz des Sensors kann eine schlechte Verbrennung früher erkannt und die Feuerungsanlage schneller an den optimalen Betriebspunkt herangeführt werden. Des Weiteren lässt sich neben der Emissionskantenoptimierung und damit der Effizienz, die Zuverlässigkeit und die Betriebsicherheit der Anlagen steigern. Ein Lebensdauernachweis

konnte aufgrund der geringen Betriebsstundenzahlen nicht abschließend erbracht werden [19].



Abbildung 171: Stand der Technik vor Projektstart (oben links) erster Prototyp mit festem Sinterfilter (oben rechts) fortgeschrittener Prototyp mit abschraubbarer Frontkappe/Sinterfilter [ab 6/2006] (unten links) und optimierter Prototyp mit Filtersieb [ab 5/2008; nach Projektende] (unten rechts) der Tauchsonde CarboSen1.000HT

Um die Modifikationen der ersten beiden Teile der Untersuchungen und ihre Effekte auch im Langzeit- bzw. Dauerbetrieb einzuschätzen, wurden entsprechende Versuche auf dem Prüfstand des TFZ durchgeführt. Dazu wurden Untersuchungsdauern von 12 bis 173 h gewählt. Die Ergebnisse zeigten für die beiden längsten Versuche über 55 h (Abnahmemessung) bzw. 173 h (Langzeittest) nur sehr geringe CO- bzw. kaum messbare C_{ges}-Konzentrationen (Höchstwerte bei 3 mg/Nm³), welche mit CO-Werten von 28 mg/Nm³ bzw. 25 mg/Nm³ die hohe Ausbrandqualität bestätigten (s. Abb. 172 und 173). Der letztere Wert liegt damit noch unter dem 10-Jahres-Mittelwert aller Typenprüfergebnisse von Holzpelletkesseln mit vergleichbarer Leistung [120]. Damit wird der hohe technische Entwicklungsstand der Feuerung hinsichtlich eines vollständigen Ausbrandes und ihrer Regelung ein weiteres Mal dokumentiert. Die NO_x-Emissionen lagen bei beiden Versuchen relativ gleichbleibend bei 531 mg/Nm³ bzw. 579 mg/Nm³. Hervorzuheben sind des Weiteren die besonders geringen Werte der Staubemissionen, welche mit Mittelwerten von 50 bzw. 51

mg/Nm³ (Schwankungsbreiten von 38 bis 64 mg/Nm³) auch die Einhaltung anspruchsvoller Staubemissionsgrenzwerte erwarten lassen [/20/].

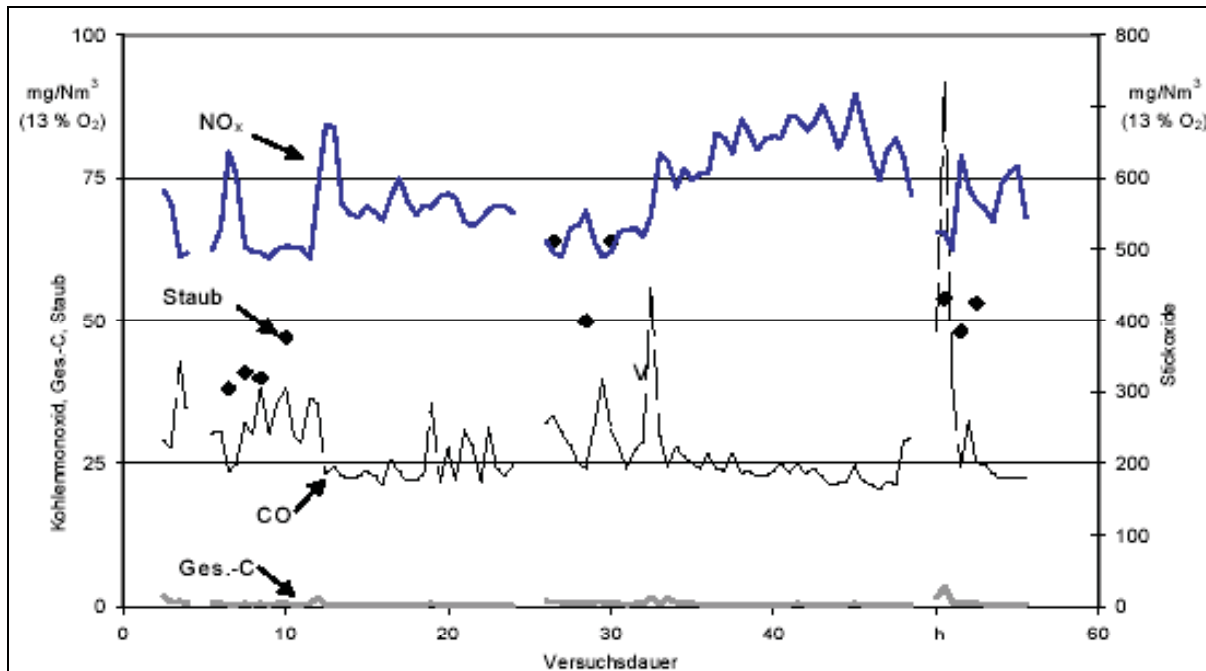


Abbildung 172: Vergleich der Emissionskonzentrationen von CO, Cges, NO_x und Staub (n = 10) während der Abnahmemessung (55 h); angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoff: Gerste

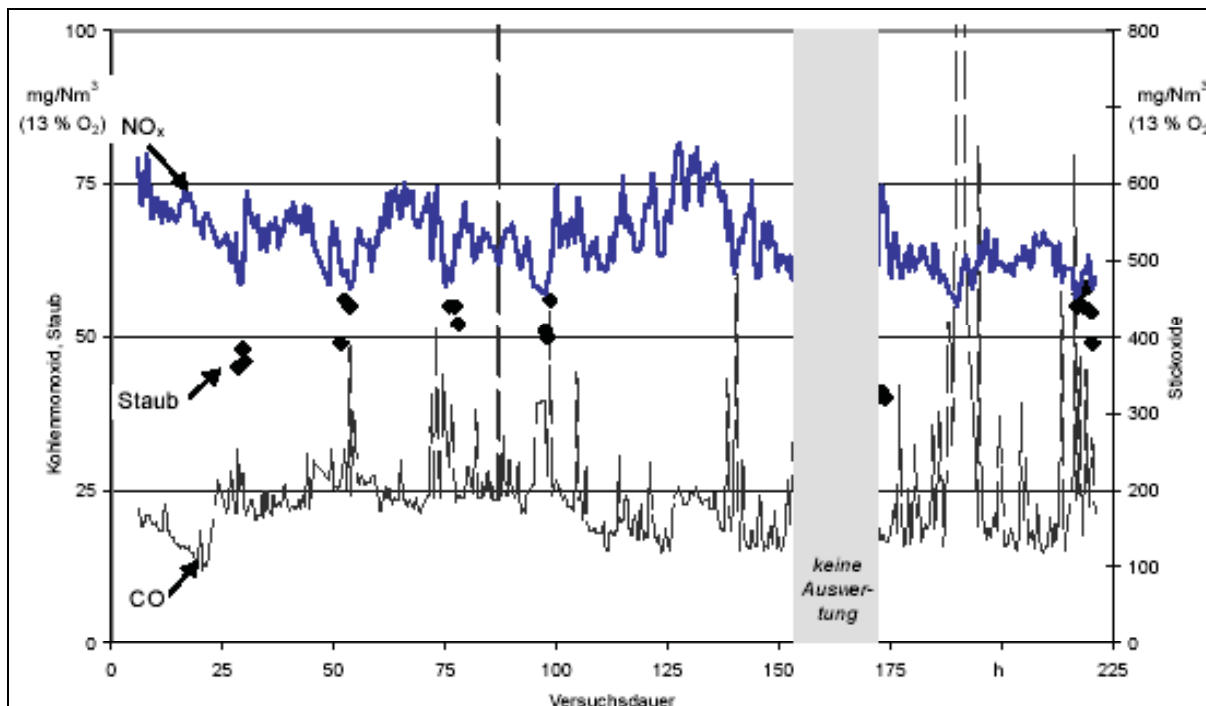


Abbildung 173: Vergleich der Emissionskonzentrationen von CO, Cges, NO_x und Staub (n = 21) während der Langzeitmessung (173 h); angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoff: Gerste

Die Parameter HCl und SO₂ werden hauptsächlich durch ihre Brennstoffinhaltsstoffe beeinflusst. Hier wurden Mittelwerte in Höhe von 257 mg/Nm³ für SO₂ und 66 mg/Nm³ für HCl gemessen.

Außerdem wurden im Rahmen der Untersuchungen der externen Messstelle (DEKRA) weitere Parameter gemessen, welche sonst nur für Anlagen mit deutlich höherer Leistung und für Brennstoffe im Rahmen der 4. bzw. 17. BImSchV relevant sind (s. Tab. 31).

Tabelle 31: Als Orientierungswerte herangezogene Grenzwerte

Parameter	Grenzwert	Einheit	nach	bezogen auf
Staub	0,15	g / Nm ³	1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
CO	4	g / Nm ³	1. BImSchV	13 % Vol. O ₂
NOx	600	mg / Nm ³	Novelle _{1.BImSchV}	13 % Vol. O ₂
Cges	50	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
Cd + TI	0,05	mg / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂
Σ Sb, As, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0,5	mg / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂
Σ As, BaP, Cd, Co, Cr	0,05	mg / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂
HCl	30	mg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
HF	3	µg / Nm ³	TA Luft	11 % Vol. O ₂
Hg	30	µg / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂
PCDD/F	0,1	ng / Nm ³	17. BImSchV	11 % Vol. O ₂

Die Untersuchungen der DEKRA zeigen dabei, dass die in Anlehnung verwendeten Grenzwerte der TA Luft bzw. der 17. BImSchV beim Einsatz von Getreide deutlich unterschritten werden. Sie liegen oft nur bei 1/10 bzw. darunter (s. Tab. 32). Lediglich für den Parameter HCl wurden höhere Werte festgestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Werte für größere Anlagen gelten, welche einen HCl Massenstrom von über 150 g/h emittieren, während die hier untersuchte Getreidefeuerung lediglich einen Massenstrom von 11 g/h verursachte.

Tabelle 32: Werte der Emissionsparameter während der Abnahmemessung (Messungen der nach § 26 zugelassenen Messstelle, alle Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand, 13 % Vol. O₂)

Parameter (13 Vol% O ₂ alle Werte)	n =	Mittelwert	Einheit	Schwankungsbreiten	Einheit
Staub	9	54	mg / m ³	41 - 68	mg / Nm ³
CO	9	36	mg / m ³	30 - 46	mg / Nm ³
NOx	9	504	mg / m ³	466 - 577	mg / Nm ³
Cges	9	< 2,6	mg / m ³	< 2,8	mg / Nm ³
Cd + TI	9	0,003	mg / m ³	0,003	mg / Nm ³
Σ Sb, As, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn	9	0,061	mg / m ³	0,080	mg / Nm ³
Σ As, BaP, Cd, Co, Cr	9	0,015	mg / m ³	0,020	mg / Nm ³
HCl	9	64	mg / m ³	51 - 81	mg / Nm ³
HF	9	14	µg / m ³	8 - 24	µg / Nm ³
Hg	9	< 0,4	µg / m ³	< 0,07 - 1,8	µg / Nm ³
PCDD/F	3	0,01	ng / m ³	0,01	ng / Nm ³

Bei längeren Betriebsdauern von 7 bis 14 Tagen kommt es je nach Brennstoffdurchsatz zu Staubablagerungen in der Feuerung bzw. im Wärmetauscher (s. Abb. 174). Daher sind entsprechende Reinigungsintervalle des Kessels bzw. des Wärmetauschers zu empfehlen,

um unnötige Wirkungsgradverluste zu vermeiden. Im Vergleich zu Holzbrennstoffen sind die Reinigungsintervalle deutlich kürzer.



Abbildung 174: Staubablagerungen in der Ausbrandglocke (oben) bzw. den Umlenkammern (unten). Neben den Staubablagerungen wurden Korrosionserscheinungen an den metallischen Bauteilen der Feuerung beobachtet (s. Abb. 175). Abschließende Bewertungen zu einer Einschränkung der Lebensdauer der Anlage konnten jedoch nicht gemacht werden. Sie sind neben dem Brennstoffeinsatz maßgeblich vom Anlagebetrieb abhängig. So sollten Taupunktunterschreitungen weitestgehend vermieden werden.

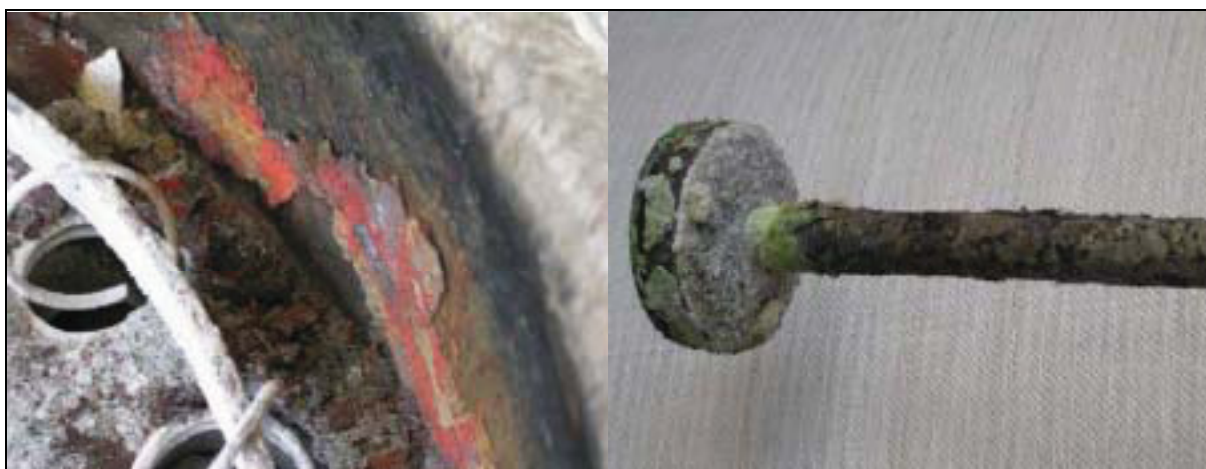


Abbildung 175: Korrosionserscheinungen am Wärmetauscher (links) und an der Verbrennungsluftlanze (rechts)

Als Schlussfolgerung der Messungen an dieser Feuerungstechnologie kann von einer sicheren Unterschreitung des derzeit gültigen Grenzwertes von 0,15 g/Nm³ ausgegangen werden. Auch einer moderate Absenkung des Grenzwertes könnte diese Anlagentechnologie noch ohne den Einsatz zusätzlicher Staubminderungsmaßnahmen gerecht werden. Der Nachweis der Genehmigungsfähigkeit konnte mit der sicheren Einhaltung der Emissionsgrenzwerte sowie mit dem Nachweis eines stabilen und weitgehenden störungsfreien Betriebs erbracht werden.

5 Schlussfolgerungen

Vor dem Hintergrund drastisch steigender Preise für fossile Energieträger wird der Einsatz biogener Festbrennstoffe neben seinen positiven Effekten zur Einsparung von Treibhausgasemissionen und der Erhöhung der regionalen Wertschöpfung mehr und mehr zur Möglichkeit, Geld zu sparen. Neben der Verwendung naturbelassener holzartiger Sortimente wie z.B. Scheitholz, Holzpellets und Holzhackschnitzeln ist im Bereich der Landwirtschaft die Verwendung hier vorhandener Haupt- und Nebenprodukte wie z.B. Getreide, Getreideausputz und Stroh besonders interessant. Im Gegensatz zum Entwicklungsstand und der Anzahl von Anbietern von Holzfeuerungsanlagen gibt es im Bereich der Halmgutfeuerungsanlagen bislang nur sehr wenige Anbieter, welche die Anforderungen bezüglich der Funktionalität, der Wirtschaftlichkeit sowie der erhöhten Anforderungen bezüglich des Immissionschutzes ausreichend erfüllen können.

Für die Verbrennung von Halmgut bieten europaweit ca. 40 Hersteller Anlagen im Leistungsbereich von 5 bis 20.000 kW an. Dabei werden im Wesentlichen Unterschub-, Einschub-, Mulden- und Rostfeuerungs-systeme angeboten. Hier wurden in den letzten Jahren verstärkt Anstrengungen unternommen, um marktfähige Produkte besonders für den Einsatz von Getreide bzw. Strohpellets anbieten zu können. Die Anlagentechniken lassen sich generell in konventionelle und in neuartige Feuerungstechnologien unterscheiden sowie nach Art der Konversion in Anlagen zur Verbrennung bzw. zur Vergasung.

Mit dem Ziel des Nachweises der Genehmigungsfähigkeit von Halmgutfeuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV wurden unterschiedlichste Praxis-, Technikums- und Prüfstandsanlagen aber auch Neuentwicklungen mit Referenzbrennstoffen in verschiedenen Leistungsbereichen untersucht. Einige der Projekte beschäftigten sich darüber hinaus mit der Entwicklung neuartiger Konversionssysteme (z.B. FLOX-Brenner) bzw. der Entwicklung von primären bzw. sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen (z.B. Kessel, Brenner, Staubabscheidetechnologien).

Bei der Verbrennung von Getreidekörnern und Strohpellets wurden sehr unterschiedliche und z.T. nur ungenügende Abbrandergebnisse an einzelnen Anlagen erzielt. Einzelne von Herstellern als tauglich ausgewiesene konventionelle Anlagen waren regelrecht ungeeignet. Hier waren besonders stark auftretende Verschlackungen die Ursache für Funktionsstörungen bis zum Totalausfall. Generell kann aber festgestellt werden, dass einige Anbieter von konventionellen Anlagentechniken in Bezug auf die CO-Emissionen die gegenwärtigen Anforderungen der 1. BImSchV durchaus erfüllen können, in Bezug auf die Staubemissionen jedoch nicht für die gesamte Breite der Brennstoffvariationen ohne den Einsatz von Abscheidetechniken genügen.

Die Ergebnisse der untersuchten Strohfeuerungsanlagen zeigen, dass ein störungsfreier Betrieb weitestgehend gewährleistet werden kann. Hinsichtlich der erreichbaren

Emissionswerte muss allerdings bezüglich der Aufbereitungsform, dem konkret eingesetzten Brennstoff bzw. der Anlagentechnologie sowie der Leistungsklasse stark differenziert werden. Gleiches Ausgangsmaterial kann dabei zu sehr unterschiedlichen Emissionsniveaus führen. Die Aufbereitung mittels Ballenauflöser sowie die Beschickung über Schneckensysteme bzw. pneumatische Zuführungen und Zellenradschleusen funktionierte reibungslos.

Neuartige Technologien zur Halmgutverbrennung zeigen radikal verbesserte Ausbrandergebnisse auf den Niveaus der besten verfügbaren Technologien für die Holzverbrennung. Einige dieser Technologien müssen jedoch noch einen stabilen Dauerbetrieb nachweisen.

Während die meisten Anbieter von Anlagentechniken die gegenwärtigen Anforderungen bzw. die höheren Anforderungen der Länder bzw. der Novelle der 1. BImSchV in Bezug auf die CO-Emissionen erfüllen können (1. BImSchV: 4,0 g/Nm³ bzw. 1. BImSchV_{Novelle,1.Stufe}: 1 g/Nm³, 1. BImSchV_{Novelle,2.Stufe}: 0,4 g/Nm³) wird hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte für die Staubemissionen deutlich, dass nur einzelne Anlagentechnologien unabhängig vom Brennstoff die Grenzwerte der 1. BImSchV sicher unterschreiten. Dies gilt um so mehr bei höheren Anforderungen hinsichtlich des Staubgrenzwertes (1. BImSchV: 0,15 g/Nm³ bzw. 1. BImSchV_{Novelle,1.Stufe}: 0,1 g/Nm³, 1. BImSchV_{Novelle,2.Stufe}: 0,02 g/Nm³) Für die Mehrzahl der untersuchten Feuerungsanlagen wird deutlich, dass der Einsatz ausgewählter Brennstoffe bzw. der Einsatz von weiteren Maßnahmen notwendig wird, um den Anforderungen zu genügen. Selbst die besten drei Technologien aus den mit Referenzbrennstoffen untersuchten Anlagen überschreiten bei ausgewählten Brennstoffen teilweise die Staubgrenzwerte der bisherigen Verordnung.

Im Sinne eines vorbeugenden Immissionsschutzes ist neben der Minimierung der Staubemissionen das Gefährdungspotential und die toxische Relevanz der entstehenden Stäube einzuschätzen. Dabei ist, neben der insgesamt etablierten Anlagenzahl (Einzelraumfeuerstätten / Zentralfeuerungskessel) als eines der wichtigsten Kriterien, die Qualität des Ausbrandes (CO-Emissionen) in Betracht zu ziehen. Von verschiedenen Institutionen wurde in zahlreichen Projekten festgestellt, dass die Qualität der Verbrennung von Halmgutbrennstoffen in geeigneten Anlagen mit den besten Holzfeuerungsanlagen vergleichbar ist. Eine damit zu erwartende geringere Toxizität der entstehenden Stäube gegenüber Stäuben aus konventionellen Holzfeuerungsanlagen bzw. Dieselruß, wurde bereits prinzipiell für Holzfeuerungsanlagen nachgewiesen und wird gegenwärtig speziell für Halmgutbrennstoffe in weiteren noch laufenden Forschungsprojekten untersucht.

Auf Grundlage der Novellierung der 1. BImSchV und dem Stand der Technik der Feuerungsanlagen wird beim Einsatz von Halmgutbrennstoffen der Einsatz von geeigneten Abscheidetechnologien besonders bei konventionellen Feuerungsanlagen notwendig. Diese

Technologien befinden sich für halmgutartige Brennstoffe gegenwärtig noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Ob kurzfristig praxisreife und ökonomisch realistische Lösungen gefunden werden können, bleibt abzuwarten. Zahlreiche Lösungsansätze konnten in den bearbeiteten Projekten erarbeitet, umgesetzt und teilweise erfolgreich getestet werden. Eine Umsetzung in die Praxis und die Testung und Prüfung im Dauerbetrieb steht noch aus. Nicht zuletzt sind die entsprechenden Kosten für die bauseitige Einbindung der Abscheider, Installationsmaßnahmen, Zusatzausrüstungen wie z.B. Rauchgasweichen, Steuerung, Ventilatoren, etc. zu berücksichtigen, welche eine Markteinführung von bewährten Produkten erschweren würden. Neben weiterer Entwicklungsarbeit zur Vereinfachung der Abscheidereinbindung in Verbindung mit der verfahrenstechnischen Kopplung Heizkesselbetrieb-Abscheiderbetrieb, wäre die Unterstützung mit Hilfe eines Markteinführungsprogrammes notwendig.

Mit den in mehr als zehn Projekten erarbeiteten Ergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Halmgut in Kleinf Feuerungsanlagen einen Entwicklungsstand erreicht hat, welcher den gegenwärtigen Anforderungen der 1. BImSchV entspricht. Probleme konventioneller Feuerungssysteme wurden erkannt, Lösungsansätze aufgezeigt und erfolgreich getestet. Neue Verbrennungs- bzw. Vergasungstechnologien wurden erprobt und zeigen vielversprechende Ergebnisse auch hinsichtlich höherer emissionsschutzrechtlicher Anforderungen. Im Rahmen der Novellierung der 1. BImSchV werden für den Anlagenbereich ab 4 kW Getreide und Getreidenebenprodukte, etc. gemäß § 3 Nr. 8 mit In-Kraft-Treten der neuen Verordnung Regelbrennstoffe. Anlagen ab 100 kW Wärmeleistung unterliegen im Bereich der 4. BImSchV der Genehmigungspflicht. Dies ist neben dem Genehmigungsverfahren verbunden mit umfangreichen und teilweise deutlich höheren emissionsseitigen Anforderungen im Sinne der TA Luft.

Die Etablierung eines Brennstoffqualitätsmanagementsystems bzw. die Entwicklung von Staubminderungsmaßnahmen ist bei den gegenwärtigen Entwicklungen der rechtlichen Rahmenbedingungen unumgänglich.

Messergebnisse der verfügbaren bzw. besten Techniken für die Verbrennung von Halmgütern zeigen, dass einzelne Technologien bzw. bei ausgewählten Halmgutbrennstoffen auch ein erweiterter Kreis von Techniken die Grenzwerte gemäß EN 303-5 sowie die Anforderungen der 1. BImSchV, als auch etwas höhere Anforderungen durchaus erfüllen können. Die im Rahmen der Novellierung der 1. BImSchV formulierten Anforderungen zur Staubminderung für Holzfeuerungsanlagen sind jedoch nicht undifferenziert für Halmgutfeuerungsanlagen anzuwenden. Die Höhe der Staubgrenzwerte der 1. Stufe mit $0,10 \text{ g/Nm}^3$ würde die Anzahl der am Markt befindlichen Anlagenhersteller bzw. einsetzbaren halmgutartigen Brennstoffe drastisch einschränken. Die Anforderungen

der 2. Stufe übersteigen klar die Möglichkeiten der gegenwärtig am Markt verfügbaren Technologien.

Es wird klar, dass eine weitere Differenzierung der Bewertung als auch der Einteilung der Halmgutbrennstoffe notwendig ist, um die verfügbaren Technologien und den Stand der Technik als Grundlage zur Festlegung realistischer Grenzwerte heranziehen zu können.

Neben einem erweiterten Geltungsbereich der 1. BImSchV für halmgutartige Brennstoffe werden leistungsabhängig folgende Emissionswerte vorgeschlagen (s. Tab. 33 und 34):

Tabelle 33: Grenz- und Zielwerte für Praxismessungen in Anlagen ab 4 kW bis < 500 kW

Zeitschiene	Stufe	Grenzwert		Zielwert
		CO	Staub	NOx
		13 % O ₂	13 % O ₂	13 % O ₂
1. BImSchV _{novelliert}		g/Nm ³	g/Nm ³	g/Nm ³
ab Inkrafttreten	1	2,0	0,130	1,0
4 Jahre nach Inkrafttreten	2	1,0	0,100	0,8
9 Jahre nach Inkrafttreten	3	0,6	0,075	0,6

Tabelle 34: Grenz- und Zielwerte für Praxismessungen in Anlagen ab 500 kW bis < 1 MW

Zeitschiene	Stufe	Grenzwert		Zielwert
		CO	Staub	NOx
		13 % O ₂	13 % O ₂	13 % O ₂
1. BImSchV _{novelliert}		g/Nm ³	g/Nm ³	g/Nm ³
ab Inkrafttreten	1	1,0	0,100	0,8
4 Jahre nach Inkrafttreten	2	0,6	0,075	0,6
9 Jahre nach Inkrafttreten	3	0,4	0,050	0,5

6 Literaturverzeichnis

- /1/ Heidenreich, R.; Birnbaum, Th. (2007): Staubabscheidetechniken für Getreide- und Strohfeuerungsanlagen, Abschlußbericht des Teilprojektes der TLL, 94 S.
- /2/ Hering, Th.; Peisker, D.; Vetter, A. (2005): „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets“. Abschlußbericht, Eigenverlag TLL, Jena 2005, 110 S.
- /3/ Hartmann, H.; Rossmann, P.; Turowski, P.; Ellner-Schubert, F.; Hopf, N.; Bimüller, A. (2007): „Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte“, Berichte aus dem TFZ Nr. 13, Eigenverlag, Straubing 2007, 126 S.
- /4/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001): „Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetz. Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV“. vom 15. Juli 1988 Bundesgesetzblatt, Teil I S. 1059, zuletzt geändert am 27. Juli BGBl. S. 1950
- /5/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002): „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Technische Anleitung Luft – TA Luft“. Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli, Heft 25-29, S. 511-605
- /6/ Staatliche Umweltbetriebgesellschaft (2002): „Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen an der Strohfeuerungsanlage der Wiesenburger Land e.G., Wiesenburg“ Messbericht, Dezember 2002, 41 S.
- /7/ Poppitz, H. (2004): „Pilotvorhaben Strohballen-Vergaserheizkessel, Wiesenburger Land e.G.“, Kurzbericht, SLUG, Radebeul Dezember 2003, 10 S.
- /8/ Staatliche Umweltbetriebgesellschaft (2005): „Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen an der Strohfeuerungsanlage der Wiesenburger Land e.G., Wiesenburg“ Messbericht, April 2005, 33 S.
- /9/ Eggersgluß, W. (2007): „Weiterentwicklung einer Feuerungsanlage für die Nutzung fester Bioenergieträger mit dem Schwerpunkt Staubreduzierung durch Einsatz eines nachgeschalteten Staubfilters“. Abschlußbericht, DEULA Schleswig-Holstein GmbH, Rendsburg November 2007, 21 S.
- /10/ Deventer, D.; Mockenhaupt, Th.; Rieker, Ch.; Block, K. (2006): „Messung an kleinen Feuerungsanlagen zur Verbrennung von Strohpellets bzw. Getreide (< 150 kW)“. Abschlußbericht, FH Köln, Köln 2007, 84 S.
- /11/ Bauermeister, U. (2007): „Felduntersuchungen des „Biokompakt® - AWK 45 SI“ zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW am Standort Bernburg“. Abschlußbericht, Halle/S. August 2007, 57 S.

- /12/ Gerber, H.; Sehn, W. (2007): „Entwicklung einer Low-NOx-Feuerung zur Verbrennung von Getreide und halmgutartigen Bioenergieträgern nach dem FLOX-Prinzip“, Abschlußbericht, FH Bingen, August 2007, 29 S.
- /13/ Frobeen, R.; Sibbertsen, J.C. (2008): Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinf Feuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide Abschlußbericht, Firma Künzel, Februar 2008, 42 S.
- /14/ Wilken, J.; Kather, A. (2008): „Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinf Feuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide“, Abschlußbericht, TU Hamburg-Haburg, Februar 2008, 71 S.
- /15/ Finner, T.; Gruber, T. (2007): Prototypenentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW Abschlußbericht, Wilhelm-Klauditz-Institut, September 2007, 87 S.
- /16/ Quicker, P.; Mocker, M.; Berger, R.; Stenzel, F. (2008): Kleinf Feuerungsanlage für Getreide und Stroh, Abschlußbericht, atz Entwicklungszentrum, April 2008, 94 S.
- /17/ Struschka, M.; Kiess, J.; Zieba, M.; Rieder, A.; Juschka, W.; Schuster, A.: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen – , Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 1 bis 10 von 172 S.
- /18/ Struschka, M.; Kiess, J.; Zieba, M.; Rieder, A.; Juschka, W.; Schuster, A.: Feld- und Prüfstandsmessungen zur Anlagenoptimierung und Adaption eines externen Staubabscheiders Teil I - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen – , Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 11 bis 86 von 172 S.
- /19/ Hammer, F.: Entwicklung und Bereitstellung von für Biomassefeuerungen einsetzbaren Abgassensoren Teil II - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen –, Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 87 bis 132 von 172 S.
- /20/ Turowski, P.; Rossmann, P.; Hartmann, H.; Marks, A. (2008): Betriebserfahrungen mit einer verbesserten 40 kW Getreidefeuerung - Teil III - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen –, Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 133 bis 172

- /21/ Eltrop, L.; Hartmann, H.; Hering, Th.; Härdtlein, M.; Kaltschmitt, M.; Kauter, D.; Kruck, C.; Lewandowski, I.; Pilz, M.; Puttkammer, T.; Thrän, D.; Unterberger, S.; Vetter, A. (2002): Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /22/ Hering, T.; Kuhaupt, H.; Vetter, A. (2001): Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Markierungsmitteln bei Non-food Getreide und Darstellung der vorhandenen Feuerungstechniken. Verband für Agrarforschung und –bildung Thüringen e.V. (Hrsg.), Eigenverlag, Jena, 63 S.
- /23/ Hering, Th., Scheftelowitz, M., Peisker, D., Vetter, A. (2008): „Bereitstellung und Analytik von Referenzbrennstoffen“, Abschlussbericht des Teilprojektes „Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Getreide- und Stroh brennstoffe“ des IE gGmbH, Leipzig, Eigenverlag, Jena, 15 S.
- /24/ Europäisches Komitee für Normung (2002): CEN/TC 335 „Solid biofuels – terminology, definitions and descriptions“
- /25/ Europäisches Komitee für Normung (2004): Schluss-Entwurf prCEN/TS 14961 „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen“
- /26/ Hartmann, H. und FNR (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen, Sonderpublikation des BMELV und der FNR, Gülzow 2007, 2. Auflage, 224 S.
- /27/ Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L. (2000): „Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten.“ Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien Nr. 154, Eigenverlag, München, 130 S.
- /28/ Oberberger, I. (2008): „Aktuelle Forschungsergebnisse bezüglich der Feinstaub- und NO_x-Bildung bei der Verbrennung von Stroh“, Vortrag im Rahmen der Tagung Strohenergie 2008, Jena
- /29/ Hering, Th.; Pilz, M. (2002): „Einflussmöglichkeiten der Brennstoffinhaltsstoffe auf die Emissionen.“ In: Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /30/ Vetter, A.; Wieser, P.; Mäusezahl, K.; Leiterer, M.; Rudolph, B.; Werner, A. (1995): Untersuchungen zum Einfluß der Brennstoffart und –qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Eigenverlag, Jena, 113 S.

- /31/ Launhardt, T; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V. (2000): Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien Nr. 156, Eigenverlag, München, 132 S.
- /32/ Hartmann, H. (2003): Verbrennungsverhalten und Emissionen bei der Nutzung von Getreidekörnern und Strohpellets als Brennstoff in Kleinfeuerungen. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 57-65
- /33/ DINplus (2002): Zertifizierungsprogramm für Holzpellets zur Verwendung in Kleinfeuerungsstätten. Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH DIN CERTCO (Hrsg.), Eigenverlag, Berlin, 8 S.
- /34/ DIN 51731 (1996): Prüfung fester Brennstoffe – Preßlinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 4 S.
- /35/ ÖNORM M 7135 (1998): Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Eigenverlag, Wien, 9 S.
- /36/ Vetter, A.; Hering, Th.; Lewandowski, I.; Kauter, D (2002): Einflussmöglichkeiten auf Biomasseertrag und Brennstoffparameter. In: Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /37/ Vetter, A.; Hering, Th. (2002): „Einfluss von Art, Standort und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf Eigenschaften annueller Pflanzen“. In: FNR (Hrsg.): Eigenschaften biogener Festbrennstoffe. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 17, Landwirtschaftsverlag Münster 2001, S. 118-133
- /38/ Deutsches Institut für Normung (1998): DIN 51730: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens. Berlin: Beuth Verlag
- /39/ Nussbaumer, Th. (2004): „Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung – Literaturstudie und Situationsanalyse“, Umwelt-Materialien Nr. 172, Luft, BUWAL (Hrsg.), Bern 2007
- /40/ Nicolaisen, L. et al (2002): Quality Characteristics of Biofuel Pellets. Danish Energy Agency file no.: 51161/00-0028, Eltra, PSO project no. 1996, Publication and print: Danish Technological Institute, 137 p.
- /41/ 4. BImSchV, Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) vom 14. März 1997

- /42/ Struschka, M; Schuster, A.; Baumbach, G. (2006): „Messungen an Pilotanlagen zur Getreideverbrennung in Hessen – Messbericht Heizperiode 2005/06“, Messbericht des Institutes für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart im Auftrag des Hessischen Bauernverbandes e.V. in Friedrichsdorf, Juni 2006, 54 S.
- /43/ Deutsches Institut für Normung (1999): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatische beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistungen bis 300 kW; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Berlin: Beuth Verlag
- /44/ Strehler, A. (2007): „Technische Lösungen zur Verminderung von Feinstaubemissionen aus kleinen bis großen Feuerungsanlagen“ In: Tagungsband, 7. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie 27.-28.09.2007, Augsburg, S.179 – 191
- /45/ Hartmann, H. (2007): „Ökonomische und ökologische Bewertung von Holzkleinfeuerungsanlagen im Rahmen der Evaluierung des Marktanreizprogrammes für erneuerbare Energien (MAP)“ In: Tagungsband, 7. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie 27.-28.09.2007, Augsburg, S. 231 – 241
- /46/ Klippel, N.; Nussbaumer, Th. (2006): „Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruß“ In: Tagungsband, 9. Holzenergie-Symposium, Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, S. 21 – 40
- /47/ Kaltschmitt, M.; Fischer, J.; Langnickel, U. (2002): „Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2002
- /48/ Lenz, V. (2007); „Die Feinstaubemissionen aus häuslichen Feuerungsanlagen Einflüsse und Minderungsmöglichkeiten“ In: Tagungsband, 7. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie 27.-28.09.2007, Augsburg, S. 171 – 178
- /49/ Kaufmann, H.; Nussbaumer, Th. (1998): “Characteristics and formation of fly ash particles in Biomass furnances”, Biomass for Energy and Industry, Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg, 1998
- /50/ Diverse (2001): Leitfaden Bioenergie. FNR e.V. (Hrsg.)
- /51/ Ballschmitter, K. (1996): „Dioxine. Chemie, Analytik, Vorkommen, Umweltverhalten und Toxikologie der halogenierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane“. Weinheim: WILWYVCH, 1996
- /52/ Oehme, M. (1998): Handbuch Dioxine, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1998
- /53/ Lohrmann, (2008): mündliche Auskunft bei Vor-Ort-Begehung

7 Anhangverzeichnis

- A 1 Heidenreich, R.; Birnbaum, Th. (2007): Staubabscheidetechniken für Getreide- und Strohfeuerungsanlagen, Abschlußbericht des Teilprojektes der TLL, 94 S.
- A 2 Eggersgluß, W. (2007): „Weiterentwicklung einer Feuerungsanlage für die Nutzung fester Bioenergieträger mit dem Schwerpunkt Staubreduzierung durch Einsatz eines nachgeschalteten Staubfilters“. Abschlußbericht, DEULA Schleswig-Holstein GmbH, Rendsburg November 2007, 21 S.
- A 3 Deventer, D.; Mockenhaupt, Th.; Rieker, Ch.; Block, K. (2006): „Messung an kleinen Feuerungsanlagen zur Verbrennung von Strohpellets bzw. Getreide (< 150 kW)“. Abschlußbericht, FH Köln, Köln 2007, 84 S.
- A 4 Bauermeister, U. (2007): „Felduntersuchungen des „Biokompakt® - AWK 45 SI“ zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW am Standort Bernburg“. Abschlußbericht, Halle/S. August 2007, 57 S.
- A 5 Gerber, H.; Sehn, W. (2007): „Entwicklung einer Low-NOx-Feuerung zur Verbrennung von Getreide und halmgutartigen Bioenergieträgern nach dem FLOX-Prinzip“, Abschlußbericht, FH Bingen, August 2007, 29 S.
- A 6 Froben, R.; Sibbertsen, J.C. (2008): Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinfeuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide Abschlußbericht, Firma Künzel, Februar 2008, 42 S.
- A 7 Wilken, J.; Kather, A. (2008): „Entwicklung einer genehmigungsfähigen Kleinfeuerungsanlage zur dezentralen Wärmeerzeugung aus Strohpellets und Getreide“, Abschlußbericht, TU Hamburg-Haburg, Februar 2008, 71 S.
- A 8 Finner, T.; Gruber, T. (2007): Prototypenentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW Abschlußbericht, Wilhelm-Klauditz-Institut, September 2007, 87 S.
- A 9 Quicker, P.; Mocker, M.; Berger, R.; Stenzel, F. (2008): Kleinfeuerungsanlage für Getreide und Stroh, Abschlußbericht, atz Entwicklungszentrum, April 2008, 94 S.
- A 10 Struschka, M.; Kiess, J.; Zieba, M.; Rieder, A.; Juschka, W.; Schuster, A.: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen – , Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 1 bis 10 von 172 S.

- A 11 Struschka, M.; Kiess, J.; Zieba, M.; Rieder, A.; Juschka, W.; Schuster, A.: Feld- und Prüfstandsmessungen zur Anlagenoptimierung und Adaption eines externen Staubabscheiders Teil I - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen – , Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 11 bis 86 von 172 S.
- A 12 Hammer, F.: Entwicklung und Bereitstellung von für Biomassefeuerungen einsetzbaren Abgassensoren Teil II - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen –, Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 87 bis 132 von 172 S.
- A 13 Turowski, P.; Rossmann, P.; Hartmann, H.; Marks, A. (2008): Betriebserfahrungen mit einer verbesserten 40 kW Getreidefeuerung - Teil III - In: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen –, Abschlußbericht, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Mai 2008, S. 133 bis 172

8 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Blick in den Feuerraum und Wärmetauscher (links), Gesamtanlage (mitte), Primär- und Sekundärluftzufuhr (rechts) beim HKRST 30/3
- Abbildung 2: Anlagenkonzept der Strohballenauflöser-Quereinschubfeuerung HKRST 60/3
- Abbildung 3: Strohballenauflöser mit Strohauflegebahn am HKRST 60/3
- Abbildung 4: Funktionsschema (links) und Containeranlage HKRST 100 (rechts)
- Abbildung 5: Zuführung der Sekundärluft über Düsenlanzen (links: HKRST 100; rechts: HKRST 30/3)
- Abbildung 6: Abscheideeinrichtungen HKRST 30/3 (links) sowie HKRST 60/3 (rechts)
- Abbildung 7: Getesteter Reka-Elektrofilter (Schema: links) an der DEULA am HKRST 100 (rechts)
- Abbildung 8: Getesteter Metallgewebefilter (Fa. Oskar Winkel) der DEULA am HKRST 100
- Abbildung 9: Funktionsschema (links), Brennraumkammer (mitte), Agro 40 (rechts)
- Abbildung 10: Funktionsschema (links), Feuerraum mit Treppenrost (mitte), Powercorn 30 (rechts)
- Abbildung 11: Funktionsschema (links), Compact C4 auf Prüfstand der FH Köln (rechts)
- Abbildung 12: Einzügige Quereinschubfeuerung (links), Brennraum Compact C4 (rechts)
- Abbildung 13: Funktionsschema (links), RHK – AK 60 bei Döpik Umwelttechnik (rechts)
- Abbildung 14: Funktionsschema (links), Riegelkettenentaschung am RHK AK-60 (rechts)
- Abbildung 15: Funktionsschema (links), C1L (rechts)
- Abbildung 16: Funktionsschema (links), AWK 45 Standort Weslarn (mitte), Standort Bernburg(rechts)
- Abbildung 17: Funktionsschema (oben), HSV 145 (unten links), Wirbelbrennkammer (unten rechts)
- Abbildung 18: Diskontinuierliche Beschickung (links), HSV 145 Gesamtanlage Standort Wiesenburg (rechts)
- Abbildung 19: Schema Wirbelbrennkammer (links), Wirbelbrennkammer HSV 145 Standort Wiesenburg (rechts)
- Abbildung 20: Ausbrandphase (links), Glut nach Ausbrandphase (rechts)
- Abbildung 21: Anheizholz (oben links), Typenschild HSV 145 (unten links), Vergaserkammer (rechts)
- Abbildung 22: Strohlagerhalle mit Strohauflegebahn (links), Ballenauflöser (rechts)
- Abbildung 23: Pneumatischer Strohtransport mit Entstaubungssystem (links), Kesselhaus (rechts)
- Abbildung 24: Blick in den Feuerraum (links), Sekundärluftzuführung und Verschlackungen im Feuerraum (rechts)
- Abbildung 25: Brennmuldenfeuerung LinKa H 400 (links), Gewebefilter (rechts)

- Abbildung 26: Funktionsschema IHT GE 30 (links, Quelle Werksprospekt), Messeanlage (rechts)
- Abbildung 27: Vorschubtreppenrostfeuerung UTSW 360 mit Metallgewebefilter der Firma Oskar Winkel (links), Blick in eine Gewebefilterabscheidekammer mit Filterpatronen (rechts)
- Abbildung 28: Probenahme Referenzbrennstoffe (Getreidekörner)
- Abbildung 29: Vergleich der Stickstoffgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 30: Vergleich der Schwefelgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 31: Vergleich der Chlorgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 32: Vergleich der Kaliumgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 33: Vergleich der Kalziumgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 34: Vergleich der Magnesiumgehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 35: Vergleich der Natriumgehalte biogener Festbrennstoffe biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 36: Vergleich der Ascheschmelzpunkte der Referenzbrennstoffe
- Abbildung 37: Vergleich der Rohaschegehalte biogener Festbrennstoffe
- Abbildung 38: Blick in den Feuerraumraum (links), den Wärmetauscher (mitte) und beschädigte Düsenlanzen (rechts) des Reka HKRST 30/3
- Abbildung 39: CO-Emissionen bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) defekter (links) und neuwertigen Düsenlanzen (rechts)
- Abbildung 40: Schlacke von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) mit unterschiedlichen Mineraliengehalten
- Abbildung 41: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 42: Vergleich der Gesamt-Kohlenstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 43: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 44: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 45: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 46: Vergleich der Staubkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 47: Vergleich der Distickstoffdioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 48: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Roh- und Reingas für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 6./7.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 49: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Roh- und Reingas für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 7./10./11.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 50: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Rohgas für den Referenzbrennstoff Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) 11.04.06 HKRST 30 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 51: Ergebnisse der kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Schwefeldioxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel (WWSH RB) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 52: Ergebnisse der Feinstaubmessungen (Rohgas) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; angegeben in %; Korngrößenverteilung hier dargestellt als PM 10 (Partikel > 10 µm); PM 2,5 (< 2,5 Partikel bis 10 µm); PM < 2,5 (Partikel ≤ 2,5 µm)
- Abbildung 53: Partikelgrößenverteilung – Niederdruckimpaktor
- Abbildung 54: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas/Teillast) in Abhängigkeit der CO-Emissionen im intermittierenden Betrieb für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 55: Feuerraumasche nach Verbrennung von Winterweizenstroh (Hacksel) – WWSH RB im Reka HKRST 60
- Abbildung 56: Ergebnisse der kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für den Brennstoff Winterweizenstroh in Form von Rundballen - Standort Wildenfels – Erhebung von Praxisdaten am HSV 145, angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 57: Vergleich der Ergebnisse der kontinuierlichen gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickoxid, Schwefeldioxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und Chlorwasserstoff für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06, angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 58: Vergleich der Ergebnisse der Staubkonzentrationen gemessen im Rein- und Rohgas für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh in Form von Strohhäcksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 59: Vergleich der Ergebnisse der Rohgas-Feinstaubmessungen für die Brennstoffe Winterweizen- und Triticalestroh als Häcksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; angegeben in %; Korngrößenverteilung hier dargestellt als PM 10 (Partikel > 10 µm); PM 2,5 (< 2,5 Partikel bis 10 µm); PM < 2,5 (Partikel ≤ 2,5 µm)
- Abbildung 60: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas) für die Brennstoffe Triticalestroh (n = 2) und Winterweizenstroh (n = 1) in Form von Strohhäcksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 61: Ergebnisse der CO-, NOx-Messungen (Rohgas) für die Brennstoffe Gerstenkörner (Gerste), Holzhackschnitzel (HHS) und Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Firma Schmid – 2007; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 62: Vergleich der CO-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrophpellets (WWSP RB), Winterroggenstrophpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 63: Vergleich der Staub-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrophpellets (WWSP RB), Winterroggenstrophpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 64: Vergleich der NO_x-Konzentrationen in Abhängigkeit der Gestaltung der Primärluftzuführung für die Brennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), Winterroggenstrohpellets (WRSP RB), Ganzpflanzentriticalepellets (GTP), Bruchkörner Gerste (BK) und DIN-Holpellets (DIN-HP) – Erhebung von Praxisdaten am GE 30, Firma IHT – 2008; bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 65: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 66: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 67: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 68: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 69: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 70: Vergleich der Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz ausgewählter Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoffe: Wintergerste WG RB (WGII) und Winterweizen WW, Kessel: AWK 45 SI
- Abbildung 71: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerste (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 72: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizen (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen –

Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 73: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 74: Vergleich der CO-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrophpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 75: Anfahrvorgang für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Buttstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 76: Typischer Verbrennungsverlauf für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Buttstedt – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 77: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 78: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 79: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 80: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 81: Vergleich der Gesamtstaubkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 82: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerstenkörner (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 83: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenkörner (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 84: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrophpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 85: Vergleich der Staub-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrophpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 86: Vergleich der Anteile der Korngrößenfraktionen anfallender Stäube in besonders geeigneten Halmgutfeuerungsanlagen Brennstoffe: WWSH RB und WW RB, Korngrößenverteilung hier dargestellt als > PM 10 (Partikel > 10 µm); PM 2,5 (Partikel 2,5 < x ≤ 10 µm); PM < 2,5 (Partikel ≤ 2,5 µm)
- Abbildung 87: Kaliumbilanz eines Pellet-Brennstoffs aus Roggenstroh
- Abbildung 88: Filterröhre mit Sprühdraht und Korona-Entladung
- Abbildung 89: Erzielte Abscheidegrade mit dem Röhrenelektrofilter (links), Vergleich der theoretischen und gemessenen Fraktionsabscheidegrade des Röhrenelektrofilters (rechts)

- Abbildung 90: Sättigungsladung als Funktion der Aufladezeit und der Stromdichte (links) und Feldausprägung bei Platten- und Rohrelektrofilter (rechts)
- Abbildung 91: Abscheiderkonstruktionsschema (links) Innenraum mit 3 Gasröhren und Füllkörper-füllung (mitte, mitte), Schütttschicht Patronen (mitte, unten), Praxisanlage (rechts)
- Abbildung 92: Agglomerationseffekte beim Einsatz des Elektrofilters am HKRST 60
- Abbildung 93: Abscheider mit Einlauf und PTFE-Formkörper zur Sprühdraht-Fixierung (links), Sprüh-Elektrode in Form von vier sternförmig angeordneten Blechen mit einer sägezahnförmigen Stanzung (rechts)
- Abbildung 94: Realisiertes Abscheidersystem in Zottelstedt (am Reka-HKRST 30)
- Abbildung 95: Staubabblagerungen im Bereich der Elektrodeneinführung (links) und der Niederschlagselektrode (rechts)
- Abbildung 96: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 97: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 98: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 99: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 100: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 101: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Wintergerstenkörner (WG RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 102: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenkörner (WW RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 103: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 104: Vergleich der Stickoxid-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Winterroggenstrohpellets (WRSP RB) in verschiedenen Feuerungsanlagen – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 105: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 106: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 107: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh (WWSH/SP RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 108: Vergleich der Kohlenmonoxid-, Gesamtstaub- und Stickoxidkonzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterroggenstroh (WRSP RB) Best of Test – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 109: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30/3, Firma Reka A/S – 2005/06; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 110: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen der Referenzbrennstoffe – Erhebung von Praxisdaten am Agro 40, Firma Agroflam – 2006/07; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 111: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe Winterweizenkörner (WW) und Wintergerstenkörner (WG) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 112: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen der Referenzbrennstoffe Winterweizen- (WWSP) und Winterroggenstrohpellets (WRSP) – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 113: Vergleich der Chlorwasserstoffkonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 114: PCDD/F Probenahme an der Praxisanlage in Dobia am HKRST 30 (links), Messpodest für PCDD/F-Messungen in Seedorf am Linka H 400 (rechts)
- Abbildung 115: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizen- bzw. Wintergerstenkörner – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 116: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 01.12.06 Agro 40 Standort Buttstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 117: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 22.01.07 Agro 40 Standort Buttstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 118: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Wintergerstenkörner (WG RB) 06./07.04.2006 HKRST 30/3 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 119: PCDD/F, PAK, Benzo(a)pyren und Kohlenmonoxid-Konzentrationen für den Referenzbrennstoff Winterweizenkörner (WW RB) 07./10./11.04.2006 HKRST 30/3 Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 120: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 121: Vergleich der PCDD/F-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstrohpellets (WWSP RB), 11.04.2006 – HKRST 30/3, Standort Zottelstedt – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Fünfstunden/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 122: Vergleich der PCDD/F-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 123: Entwicklung der PCDD/F-Emissionskonzentrationen in Abhängigkeit vom Chlorgehalt Brennstoff – Rohgasuntersuchungen der Referenzbrennstoffe in Praxisanlagen [HKRST 30 (WW/WG) und 60 (WWSH); Agro 40 (WW/WG); RHK-AK 60 (WW/WG/WWSP) und AWK SI 45 (WW/WG)]
- Abbildung 124: Vergleich der Polychlorierte Biphenyle (PCB)-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 125: Vergleich der Benzo(a)pyren-Emissionskonzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) und Winterweizen- (WW RB) sowie Wintergerstenkörner (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 126: Vergleich der PAK-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizen- bzw. Wintergerstenkörner (WW RB) bzw. (WG RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 127: Vergleich der PAK-Konzentrationen für die Referenzbrennstoffe Winterweizenstroh als Häcksel (WWSH RB) bzw. Pellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Roh- und Reingas bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 128: Vergleich der PAK-Konzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 129: Vergleich der BTX-Emissionskonzentrationen bei Volllast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen; bdl – below detection limit [unter Nachweisgrenze]
- Abbildung 130: Vergleich der BTX-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste und Winterweizen (WG/WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 131: Vergleich der Benzol-Emissionskonzentrationen bei Volllast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) – Erhebung von Praxisdaten im Rohgas; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen; bdl – below detection limit [unter Nachweisgrenze]

Abbildung 132: Vergleich der Benzol-Emissionskonzentrationen bei Voll- bzw. Teillast beim Einsatz von Referenzbrennstoffen Wintergerste- und Winterweizenkörner (WG und WW RB) sowie DIN-Holzpellets (HP) beim Einsatz im AWK 45 SI – Erhebung von Praxisdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 133: CAD-Konstruktion FLOX-Pyrolysereaktor (links) Versuchsaufbau des FLOX-Reaktors im Technikum der FH Bingen (rechts)

Abbildung 134: Prinzipbild des Biomasse (links) Grundkonstruktion des Pyrolysereaktors (rechts)

Abbildung 135: Nachschwelreaktor (links) Pyrolysegasrohr (rechts)

Abbildung 136: Pyrolyseaschen Weizenkörner (links) Weizenschrot (rechts)

Abbildung 137: Mit Staub belegte Impaktorstufen

Abbildung 138: Abhängigkeit der Stickoxidemissionen vom Brennstoffstickstoffgehalt (oben) und Abhängigkeit der Stickoxidemissionen vom Luftüberschuß (unten)

Abbildung 139: Serienreifer Rieselbrenner (links) erster Kesselprototyp – Flammenrohrkessel (mitte) 2. Kesselprototyp: Registerkessel mit Seitenschubbrenner (rechts)

Abbildung 140: Aufbau der vier entwickelten Brennerprototypen für den Flammenrohrkessel

Abbildung 141: Versuche mit Unterschubrenner – Flammenrohrkessel

Abbildung 142: Aufbau der vier entwickelten Brennerprototypen für den Registerkessel mit Seitenschubbrenner

Abbildung 143: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen beim Einsatz von Holzpellets (HP) bzw. Referenzbrennstoffen WWSP (WP), WRSP (RP) und WG (GK) für den Registerkessel; Erhebung von Technikumsdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13% Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 144: Vergleich der Emissionskonzentrationen beim Einsatz von Holzpellets (HP) bzw. Referenzbrennstoffen WWSP (WP) und WRSP (RP) für den Registerkessel; Erhebung von Technikumsdaten; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13% Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

Abbildung 145: Entwicklungsstufen des entwickelten „Rohrbrenners“

Abbildung 146: Vergleich der Entwicklungen der CO-Konzentrationen verschiedener Biomassen

Abbildung 147: Vergleich verschiedener Halmgutaschen

Abbildung 148: Filterprototyp mit drehenden Scheiben (links) bzw. mit Sprühelektroden (rechts)

- Abbildung 149: Schubrostfeuerung der Firma WVT-Bioflamm (links Schema) und auf dem ILK Prüfstand (rechts)
- Abbildung 150: Partikelgrößenverteilung im Rohgas (links oben), im Reingas (links unten), Anteil der zurückgehaltenen Partikel bezogen auf den Partikeldurchmesser (rechts oben) und ermittelte Staubmasse im Impaktor nach 900 s im Normzustand trocken (rechts unten)
- Abbildung 151: Schema der Rostfeuerung des atz (oben) und Blick auf Roststufen und separate Bewegungselemente (unten)
- Abbildung 152: Schematischer Aufbau (links) und Darstellung der numerischen Simulation der Verweilzeiten der Nachbrennkammer (rechts)
- Abbildung 153: Nachbrennkammer mit installiertem Mischzyklon (links) und Rauchrohrwärmetauscher mit Abreinigungsspiralen (rechts)
- Abbildung 154: Schema der Vorschubrostfeuerung des atz (oben) und Blick auf den Antrieb der Rostelemente (unten links) sowie ein Rostelement (unten rechts)
- Abbildung 155: Feuerungsraum mit Umlenkelement (links) und eingebauter VB Brenner (rechts)
- Abbildung 156: Schema des Schütttschichtfilters (links) und Filter-Cluster des ALPHA-Filters (rechts)
- Abbildung 157: Im Wärmetauscher eingebaute Korrosionssonden
- Abbildung 158: Blick in den Feuerraum nach Verbrennung von Wintergerstenkörner (WG RB) (links) und Winterweizenstrohpellets (WWSP RB) (rechts)
- Abbildung 159: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des ersten Anlagenkonzeptes – Stufenrost mit Mischzyklon – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 160: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des ersten Anlagenkonzeptes – Stufenrost mit Mischzyklon – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 161: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des zweiten Anlagenkonzeptes – Vorschubrost mit VB-Brenner – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Abbildung 162: Vergleich der Stickstoffoxidkonzentrationen für alle Referenzbrennstoffe – Prüfung des zweiten Anlagenkonzeptes – Vorschubrost mit VB-Brenner – des atz; angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 163: Vergleich der Staubkonzentrationen für WG und WW am Stufenrost mit Mischzyklon und Schütttschichtfilter in Abhängigkeit der Schüttung und der Schütthöhe; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 164: Vergleich der Staubkonzentrationen für WWSP und WRSP am Stufenrost mit Mischzyklon und Schütttschichtfilter in Abhängigkeit der Schüttung und der Schütthöhe; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 165: Vergleich der Staubkonzentrationen der Referenzbrennstoffe WG, WW, WWSP und WRSP am Vorschubrost mit VB-Brenner und ALPHA-Filter; angegeben als Schwankungsbreiten der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Abbildung 166: Aufbau des Edelstahl-Gewebefilters im Abgassystem der Passat Compact C8 Anlage (links) und Filterpatrone mit Edelstahlgewebe bei geöffneter Filterkammer (rechts)
- Abbildung 167: Oberflächen der Filterpatronen nach den Versuchen mit Gerste, Roggenstrohpellets, Hafer und Weizen (von links nach rechts)
- Abbildung 168: Neuer Verbrennungsluftzylinder und bewegliche Sonde für Sekundärluft (links) Sondenkopf (mitte) und Verbrennungsluftring zur Verteilung der Nachverbrennungsluft (rechts)
- Abbildung 169: CO-, NOx- und O2 Konzentrationen im Abgas des Agro 40 beim Betrieb ohne und mit Luftstufung, Brennstoff: Gerste – WG
- Abbildung 170: Aufbau des CarboSen Sensorelements (oben) mit 5 Drähten und Glasfixierung (unten)
- Abbildung 171: Stand der Technik vor Projektstart (oben links) erster Prototyp mit festem Sinterfilter (oben rechts) fortgeschrittener Prototyp mit abschraubarer Frontkappe/Sinterfilter [ab 6/2006] (unten links) und optimierter Prototyp mit Filtersieb [ab 5/2008; nach Projektende] (unten rechts) der Tauchsonde CarboSen1.000HT

Abbildung 172: Vergleich der Emissionskonzentrationen von CO, Cges, NOx und Staub (n = 10) während der Abnahmemessung (55 h); angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoff: Gerste

Abbildung 173: Vergleich der Emissionskonzentrationen von CO, Cges, NOx und Staub (n = 21) während der Langzeitmessung (173 h); angegeben als Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen, Brennstoff: Gerste

Abbildung 174: Staubablagerungen in der Ausbrandglocke (oben) bzw. den Umlenkammern (unten)

Abbildung 175: Korrosionserscheinungen am Wärmetauscher (links) und an der Verbrennungsluftlanze (rechts)

9 Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Übersicht der geförderten Projekte im Rahmen des Förderschwerpunktes „Energetische Nutzung von Getreide und halmgutartigen Biobrennstoffen“ von BMELV/FNR (Bekanntmachung vom 16.05.2003)
- Tabelle 2: Übersicht des Untersuchungsprogrammes des Projektes der TLL
- Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Feuerungsanlagen und Brennstoffe im Rahmen von Feldtests, Technikums- bzw. Prüfstandsuntersuchungen
- Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Emissionsparameter in den einzelnen Feuerungsanlagen mit Referenzbrennstoffen bzw. in reinen Strohfeuerungsanlagen
- Tabelle 5: Übersicht der in den Projekten untersuchten Brennstoffe
- Tabelle 6: Vergleich der Stickstoffgehalte der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 7: Vergleich der Schwefelgehalte der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 8: Vergleich der Chlorgehalte der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 9: Vergleich der mineralischen Inhaltstoffe der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 10: Vergleich der Rohaschegehalte der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 11: Vergleich der Heizwerte der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 12: Vergleich der aerosolbildenden Inhaltsstoffe der Referenzbrennstoffe
- Tabelle 13: Relevante Schwermetalle für die Ascheverwertung
- Tabelle 14: Überblick der Analyseergebnisse der Referenzbrennstoffe (RB)
- Tabelle 15: Überblick über die als Bewertungsmaßstab herangezogenen Grenzwerte
- Tabelle 16: Emissionsanforderungen für die Getreideverbrennung in einzelnen Bundesländern [mg/Nm³, 13 % Vol. O₂]
- Tabelle 17: Ergebnisse der PCDD/F Messungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Firma Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 18: Ergebnisse der PAK Messungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Firma Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 19: Ergebnisse der Benzo[a]pyrenmessungen (Rohgas/Reingas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Firma Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen

- Tabelle 20: Ergebnisse der Benzolmessungen (Rohgas) beim Einsatz der Referenzbrennstoffe (WG / WW / WWSP) – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 30, Firma Reka A/S; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 21: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas/Teillast) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 22: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas/Vollast) für den Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am HKRST 60, Fa. Reka A/S – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 23: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Rohgas) für die Brennstoffe Triticalestroh (Messung 1 und 2) und Winterweizenstroh (Messung 3) in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 24: Ergebnisse der PCDD/F, PAK und Benzo(a)pyrenmessungen (Reingas) für die Brennstoffe Triticalestroh (Messung 1 und 2) und Winterweizenstroh (Messung 3) in Form von Strohhacksel – Erhebung von Praxisdaten am H 400, Firma Linka – 2005/06; bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas unter Normbedingungen
- Tabelle 25: Vergleich der Korngrößenverteilungen in Abhängigkeit vom Lastzustand
- Tabelle 26: Massenverhältnisse charakteristischer Elemente im Vergleich
- Tabelle 27: Ergebnisse der Staubemissionsermittlungen mit und ohne Abscheider der HKRST 60
- Tabelle 28: Übersicht Mess- und Berechnungsergebnisse Abscheiderversuche (15 min Mittelwert)
- Tabelle 29: Vergleich der entwickelten und geprüften Abscheidetechnik
- Tabelle 30: Vergleich der NO_x-Konzentrationen in Abhängigkeit des Brennstoffstickstoffgehaltes
- Tabelle 31: Als Orientierungswerte herangezogene Grenzwerte
- Tabelle 32: Werte der Emissionsparameter während der Abnahmemessung (Messungen der nach § 26 zugelassenen Messstelle, alle Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand, 13 % Vol. O₂)

Tabelle 33: Grenz- und Zielwerte für Praxismessungen in Anlagen ab 4 kW bis < 500 kW

Tabelle 34: Grenz- und Zielwerte für Praxismessungen in Anlagen ab 500 kW bis < 1 MW

10 Abkürzungsverzeichnis

FKZ	Förderkennzeichen
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
ILK	Institut für Luft und Kältetechnik
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
FuE	Forschung und Entwicklung
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
FH	Fachhochschule
TU	Technische Universität
WKI	Wilhelm-Klauditz-Institut
IVD	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen
TA Luft	Technische Anleitung Luft
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
DEULA	Lehranstalt für Agrar- und Umwelttechnik Schleswig Holstein GmbH
FLOX	Flammenlose Oxidation
KFA	Kleinfeuerungsanlage
FBZ	Forschungs- und Beratungszentrum für Maschinen- und Energiesysteme e.V.
TFZ	Technologie und Förderzentrum Straubing
RB	Referenzbrennstoffe
WW	Winterweizenkörner
WG	Wintergerstenkörner
WWSP	Winterweizenstrohpellets
WWSH	Winterweizenstrohhäcksel
WRSP	Winterroggenstrohpellets
LAU	Landesamt für Umweltschutz des Landes Sachsen Anhalt
NWL	Nennwärmeleistung
UBG	Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft
SLUG	Sächsische Landesanstalt für Umwelt und Geologie
PTG	Pelletier- und Transportgesellschaft
KUP	Kurzumtriebsplantagen
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
PAK	Polzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
BTX	Benzol, Toluol und Xylol
PCB	Polychlorierte Biphenyle
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
MAP	Marktanreizprogramm

Wo / Rhe	Wolfram / Rhenium
PTFE	Polytetrafluorethylen
NE	Niederschlagselektrode
MSR	Mess-Stell-Regel

Übersicht über die Analysemethoden für die Referenzbrennstoffe

Parameter	Verfahren	Norm
TS-Bestimmung	im Trockenschrank	VDLUFA MB BD. III, 3.1
Rohasche	mit Trockenveraschung im Muffelofen	VDLUFA MB BD III 8.1
C*	org. (und Gesamtkohlenstoff) nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	DIN ISO 10694 (1996)
N	Gesamtstickstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	DIN ISO 13878:1995
H*	Wasserstoff mittels trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	METHODE ELEMENTAR
O ₂	berechnen	
Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Si, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Sr	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	Hausmethode SOP V1-260-01
Heizwert, oberer*	Verbrennung im Bombenkalorimeter	DIN 51900-1und2
Heizwert, unterer*	Verbrennung im Bombenkalorimeter	DIN 51900-1und2
Druckaufschluss	mit HNO ₃ oder	VDLUFA MB-VII:1996
Mikrow.-Druckaufschl.	mit HNO ₃ /H ₂ O ₂ -Gemisch in geschlossenem Quarzglasgefäßen	HAUSVERFAHREN
As	mit Hybrid-AAS	DIN EN ISO 11969:1996-11
Hg	mit Kaltdampf-AAS	DIN EN 1483: 1997-05
Cr (ETA-AAS)	mit Graphitrohr-AAS	DIN EN 1233.4: 1996-07
Ni (ETA-AAS)	mit Graphitrohr-AAS	DIN 38406-E11-2:1991-09
Cd, Pb, Ti	mit ICP-MS	DIN EN ISO 17294-2:2005-02

*validiertes Verfahren, aber nicht im Umfang der nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten Verfahren enthalten

Prüfverfahren der DBI-AUA GmbH zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens der Referenzbrennstoffe

Parameter	Verfahren	Norm
Wassergehalt	Thermisches Verfahren, Analysenautomat MAC-500	DIN 51 718, 2002-06
Aschegehalt	Analysenautomat MAC-500	DIN 51 719: 1997-07
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen	Analysenautomat MAC-500	DIN 51 720: 2001-03
Asche-Schmelzverhalten	oxydierende Atmosphäre - Luft	DIN 51 730: 1998-04

Messanleitung

Erarbeitet von der TLL mit Änderungen und Ergänzungen seitens des TFZ und IVD sowie der FNR.

Allgemeine Angaben

Beschreibung und Herkunft der Brennstoffe:

1. Fruchtart
2. Aufbereitungsform (geometrische Abmaße bei Pellets, ggf. Abrieb)
3. Pflanzenbestandteil (Korn, Stroh, Ganzpflanze)
4. Brennstoffprobe entnehmen (ca. 2 kg)
5. Bestimmung des Wassergehaltes (Methode angeben)
6. Angabe der vorliegenden Analyseergebnisse (Inhaltsstoffe, Heizwert, etc.)

Bei Verwendung von Zuschlagstoffen: Dokumentation der Komponenten und Gewichtsanteile in Masseprozent (m-%)

Bei Brennstoffmischungen: Angabe der Mischungsanteile in Masseprozent (m-%)

Beschreibung der Feuerungsanlage

1. Standort, Betreiber
2. kurze Beschreibung der Heiz-/Prozesswärmanlage
3. Angabe wesentlicher Komponenten (z.B. Pufferspeicher)
4. Anlagedaten, Typenschild, etc.

Beschreibung des Versuchsaufbaus

1. Angabe der eingesetzten Messverfahren
2. Angabe der eingesetzten Messgeräte (Messbereiche, Prüfgaskonzentrationen, Material der Probenahmesonde, Gasaufbereitung (Trocknung, Reinigung, Kühlung)
3. Dokumentation der Probenahmestellen

Angaben auf Messprotokoll

klare Gliederung und Bezeichnung der Versuche

Angaben, ob Prüfstand, Feldtest, Dauerversuch (Zeitdauer) oder F&E (Abnahmemessung)

Angaben über Versuchstag, Uhrzeit, Abgasrandbedingungen (Volumenströme!), etc.

Versuchsablauf

Generell gilt: möglichst einheitlicher Versuchsablauf für alle Brennstoffe

Versuchsvorbereitung:

1. Falls vorhanden, Prüfbericht zur Typenprüfung besorgen und vorhandene Anlagen-ausstattung mit der Anlagenbeschreibung aus dem Prüfbericht vergleichen: Lambdasonde, Turbulatoren, Schamotte,-Umlenkplatten, Ascheschnecken, etc.. Bei unvollständiger Anlage keine Messungen durchführen!
2. Einbindung der Kesselhersteller bei der Kesseleinstellung
3. Kesselreinigung vor Versuchsbeginn mit neuen Brennstoffen (Feuerraum, Wärme-tauscher, Flugascheauffangbereiche) vornehmen. Ein ggf. vorhandener Ascheauffangbehälter sollte vor bzw. während der Messung nicht vollständig entleert sein (Gefahr von Falschlufzutritt vor allem bei unterdruckgeregelten Kesseln!). Vor der eigentlichen Messung - Einfahren der Anlage mit dem zu untersuchenden Brennstoff (ca. 2 Stunden), wenn Anfahrprozesse nicht betrachtet werden sollen.
4. Keine Kesselreinigung bei Lastwechsel als Versuchsvariante!
5. Einstellung der Anlage in Vorversuchen (Luftzuführung, Takt- und Pausenzeiten der Brennstoffzuführung, Ascheentnahme, etc.) mit dem Ziel einer Minimierung der CO-Werte. Die Vorgehensweise und Einstellungen sollten dokumentiert werden. Bei der Durchführung der einzelnen Versuche keine weitere Änderungen der Anlageneinstellung vornehmen.
6. Einstellung gleicher Vor- und Rücklauftemperaturen bei allen Brennstoffen vornehmen, wobei die Rücklauftemperatur durchgehend über 55 °C liegen sollte (bei Prüfstandsmessungen). Bei Feldmessungen sind die Messungen unter den standortüblichen Gegebenheiten durchzuführen, ohne dass diese gezielt beeinflusst werden.

Messdauer/Messwerterfassung/Bezugsrechnung

Bei kontinuierlich gemessenen Größen sollten 30- oder 60-Sekundenmittelwerte (echte Mittelwerte) erfasst und dokumentiert werden. Hieraus lassen sich dann entweder nach TA Luft Halbstundenmittelwerte und/oder nach 1. BImSchV 15-Minutenmittelwerte für z.B. CO berechnen. Außerdem lassen sich bestimmte Betriebszustände, für die eine Mittelwertbildung über einen längeren Betriebszeitraum nicht sinnvoll ist (wie z.B. Lastwechsel oder Anfahrvorgänge), ebenfalls darstellen und bewerten. Werden zeitgleich zu den kontinuierlich erfassten Größen auch diskontinuierliche Messgrößen wie z.B. Staub, Dioxine/Furane oder HCl ermittelt, so müssen die Auswertintervalle der kontinuierlichen und diskontinuierlichen erfassten Größen übereinstimmen. Die Probenahmedauer bei den diskontinuierlich erfassten Größen muss sich grundsätzlich nach den Anforderungen des

Messverfahrens richten. Sollen jedoch die Emissionen der Feuerungsanlage im ungestörten Dauerbetrieb bei einem bestimmten Lastzustand beschrieben werden, so können die Messungen auch nur in dem Zeitraum durchgeführt werden, bei der dieser Betriebszustand wirklich vorliegt. Das starre Festhalten an einem bestimmten Zeitintervall (TA Luft oder 1. BImSchV) kann hier die Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Messergebnisse erheblich einschränken. Abnahmemessungen zugelassener Messstellen (nach §§ 26, 28 BImSchG) müssen nach den messtechnischen Anforderungen der TA Luft durchgeführt werden.

Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen sind auf 11 % Vol. Sauerstoff zu beziehen. Für die Komponenten CO und Gesamtstaub sind zusätzlich die Angaben auf 13 % Vol. Sauerstoff zu beziehen.

Die kontinuierlichen Messungen sind über den gesamten Zeitraum des Versuchs darzustellen.

Für diskontinuierliche Untersuchungen nach TA Luft sind mindestens 3 Messungen, bei der Staubbemessung nach 1. BImSchV (15-Minuten Untersuchungszeitraum) 6 Messungen, durchzuführen. Auf ausreichende Wärmeabnahme ist zu achten, um Leistungsschwankungen zu minimieren.

Messungen mit den ausgewiesenen Referenzbrennstoffen durch die Stellen nach § 26 BImSchG erfolgen ausschließlich nach den Vorgaben der TA Luft (VDI-Richtlinien) unter Beachtung der Vorgaben für das erweiterte Messprogramm gemäß den Anforderungen des BMU/UBA.

Die Untersuchung der PAK erfolgt durch 16 EPA-PAK Messung.

Bei Feinstaubuntersuchungen ist bei allen Impaktormessungen die Fraktion PM 2,5 zu ermitteln. Wenn kleinere aerodynamische Durchmesser bestimmt werden können, sollte auch die Fraktion PM 1 ausgewertet werden.

Bei den Staubbemessungen ist der sorgsam Filtervor- und -nachbehandlung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Wird bei den Staubbemessungen das Messverfahren nach 1. BImSchV eingesetzt, sollten die Filtermedien nach Abkühlung im Exsikkator in der gleichen Reihenfolge zurückgewogen werden, wie bei der Erstwiegun nach dem Ausheizen im Trockenschrank, sofern die Auswertung nicht im Zentrallabor des ZIV erfolgt. Bei Staubbemessungen gemäß TA Luft erfolgt die Auswiegun nach VDI Richtlinienreihe 2066.

Sonstige Anmerkungen:

Grundsätzlich gilt, dass die Vergleichbarkeit der Messergebnisse nicht nur von der Messdauer abhängt, sondern noch von vielen anderen Faktoren wie z.B. der eingesetzten Messtechnik und deren technischer Zustand, des gesamten eingesetzten Messverfahrens, die Durchführung der Messungen und die Kenntnisse der Durchführenden.

Lassen es die Umstände zu, sollte man sich an den Messdauern nach 1. BImSchV / TA-Luft halten. Auf jeden Fall sollten die Messergebnisse nachvollziehbar beschrieben werden, u.a. durch die Angaben von: Messaufgabe (z.B. ungestörter Dauerbetrieb bei bestimmter Last, Anfahrvorgang), Messdauer, Anzahl der Messwiederholungen bei diesem Betriebszustand, Standardabweichung bei Messwiederholungen oder nur einer Messung für kontinuierlich erfasste Größen.

Werden FID's zur Bestimmung der Summe gasförmiger organischer Verbindungen eingesetzt, sollte Propan als Prüfgas verwendet werden.

Die im Impaktor gesammelte Gesamtstaubmasse ist **nicht** dazu geeignet, hieraus die Gesamtstaubkonzentration im Abgas zu berechnen. Die absoluten Mengenanteile der Fraktionen in mg/Nm^3 , tr. werden aus der Impaktormessung bestimmt. Die prozentualen Anteile beziehen sich auf die Ermittlung des Gesamtstaubes nach VDI Richtlinienreihe 2066. Auf ausreichende Ein- und Auslaufstrecken ist zu achten: mind. 3 mal Innendurchmesser des Rauchgasrohres nach VDI 2066.

Lastzustände

Je nach Brennstoff kann sich die maximal mögliche Leistung deutlich unterscheiden und von der Nennwärmeleistung (bei Verwendung von Hackschnitzeln oder Holzpellets) stark nach unten hin abweichen. Daher ist in allen Versuchen die maximale brennstoffspezifische Leistung im Beharrungszustand bei konstanter Wärmeabnahme anzustreben (ist in Vorversuchen zu ermitteln!), allerdings sollte die Nennwärmeleistung dabei nicht überschritten werden.

Teillastversuche sollten bei 50 % der Nennwärmeleistung oder der maximal möglichen Leistung durchgeführt werden. Ein Betrieb im niedrigsten Lastpunkt (lt. Herstellerangabe) ist nicht sinnvoll. Bei Praxisversuchen ist eine Leistungsbestimmung oft nicht direkt möglich. Um eine maximal mögliche Leistung erreichen zu können, ist bei der Planung von Praxisversuchen auf Zeiten mit ausreichender Wärmeabnahme zu achten.

Die Lastzustände bei den Feldmessungen ergeben sich anhand der Wärmeanforderung und der Einstellung der Feuerungsanlage und deren hydraulischen Einbindung in den Heizkreis. Hier sollte nicht eingegriffen werden, da ja der reale Praxisbetrieb erfasst werden soll. Wenn möglich sollte aber die Feuerungsleistung, zumindest näherungsweise, ermittelt werden, damit die Betriebszustände dann auch Prüfstandsmessungen zugeordnet werden können. Messungen sollten allerdings auch bei den installierten Anlagen nur dann durchgeführt werden, wenn eine für den Heizbetrieb typische Wärmeabnahme sichergestellt ist. Messungen bei minimalem Wärmebedarf in der Übergangszeit oder im Sommerbetrieb sollten nur zur ergänzenden Beurteilung des Betriebsverhaltens der Anlage vorgenommen werden.

Messverfahren und Versuchsaufbau der Feldmessungen TLL /TLUG

Kontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die kontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

Nichtdispersive Infrarotabsorption (NDIR)

Die nach diesem Prinzip arbeitenden Messgeräte werden zur Messung von CO-, CO₂-, NO-, N₂O- und SO₂- Konzentrationen eingesetzt. Es kamen Messgeräte der Firma Maihak AG zum Einsatz. Regelmäßig erfolgte die Kalibrierung der Messgeräte mit folgenden zertifizierten Prüfgasen:

CO	834	mg/m ³	Messgerät: UNOR 6N
CO ₂	18,1	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610
NO	805	mg/m ³	Messgerät: UNOR 610
SO ₂	798	mg/m ³	Messgerät: UNOR 610
N ₂ O	52,5	mg/m ³	Messgerät: UNOR 6N
O ₂	25	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610

Berechnung der NO₂-Konzentration

Für diese Aufgabe wurde ein NO₂/NO- Konverter INOX-CV der Firma INSAT AG eingesetzt. Das im Messgas enthaltene NO₂ wird im Konverter zu NO reduziert. Das reduzierte NO und das bereits enthaltene NO im Messgas gelangt zur Messeinheit und wird detektiert. Die Summe aus NO und reduziertem NO₂ ergibt den Gehalt an NO_x (Summenwert) im Messgas.

Flammenionisationsdetektor (FID)

Mit dem FID wurden die organischen Kohlenstoffverbindungen als Summe des gesamtorganischen Kohlenstoffes (C_{ges}) gemessen. Das Messgerät FID-Analysator Modell 3006 der Firma Bernath-Atomic kam zum Einsatz.

Zu Beginn jedes Versuchstages wurde das FID mittels eines zertifizierten Prüfgases (Propan) von 133 mg/m³ kalibriert.

Magnetodynamisches Messverfahren

Die paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffs werden bei diesem Messverfahren zur Bestimmung des O₂ - Gehaltes genutzt. Das Messgerät OXOR 610 der Firma Maihak kam dabei zum Einsatz.

Diskontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die diskontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

Gesamtstaub-Rohgas: VDI 2066 Blatt 2

Zur Bestimmung des Staubgehaltes wurden drei Messungen mit jeweils 30 Minuten Messdauer durchgeführt. Die Probe wurde isokinetisch dem Rauchgas entnommen.

Das Rückhaltesystem der Partikelemission bestand aus Titanfilterhülse gestopft mit feinfaseriger Quarzwolle und nachgeschaltetem Planfilter aus Quarzfaser (Munktel 360).

Analytik: Trocknung und Abkühlung (Eksikator) der Filter, anschließende Auswage

Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

Gesamtstaub: 1. BlmSchV

Die Staubmessungen mit Hilfe des Schornsteinfegermessgerätes SM96-CO der Fa. Woehler wurden nach Anlage III der 1. BlmSchV durchgeführt (drei Messungen mit jeweils 15 Minuten Messdauer).

Analytik: Trocknung und Abkühlung (Exsikkator) der Filter, anschließende Auswage

Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

Chlorwasserstoff als HCl: nach DIN EN 1911

Die Probenahme erfolgte mittels beheizter Entnahmesonde, Partikelfilter und 2 in Reihe geschalteter Gaswaschflaschen, welche mit destilliertem Wasser als Absorptionsmittel gefüllt waren.

Analytik: Ionenchromatographie

PCDD/F, PAK: nach DIN EN 1948-1, 2, 3

Die Probenahme wurde mittels gekühlter Sonde, Kondensatgefäß und XAD- Kartusche durchgeführt. In das Kondensatgefäß wurden 300 ml Wasser (für HPLC) vorgelegt. Diese Vorlage wurde mit $^{13}\text{C}_{12}$ -12378 PeCDF, $^{13}\text{C}_{12}$ -123789HxCDF, $^{13}\text{C}_{12}$ -1234789HpCDF gespikt (Probenahmestandard). Die Probe wurde über 5 Stunden dem Rauchgas entnommen, so dass ca. 2 bis 2,5 m³ i. N. tr. Teilgasvolumen pro Stunde gesammelt werden konnte. Die Probenahme erfolgte isokinetisch.

Analytik:

Das gesamte Kondensat sowie ggf. das Sondenmaterial wurde einer dreifachen flüssig/flüssig- Extrakten mit Toluol unterzogen. Das Toluol wurde vorher zur mehrstufigen Spülung der Originalflaschen eingesetzt. Adsorbens und Staubfilter wurden mit dem Toluol aus der Extraktion 16 h im Soxhlet extrahiert. Die Proben wurden zum $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten

PCDD/F – Standard (alle 2378-Kongeneren der zu analysierenden Homologengruppen) gegeben (Extraktionsstandard). Nach säulenchromatographischer Reinigung erfolgte die Zugabe von $^{13}\text{C}_{12}$ -1234-TetraCDD (Spritzenstandard), um die Wiederfindungsraten der vorher eingesetzten $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten PCDD/F-Standards bestimmen zu können. Zur Analyse wurde der Gaschromatograph HP 5890 II, gekoppelt mit dem HP-MSD 5970, verwendet. Als Kapillare fand eine SP 2331 Verwendung. Wie auch in der Literatur beschrieben, lassen sich die 12378- und 12348-PentaCDF sowie die 123478- und 123479-HexaCDF an SP-2331 als GC- Phase nicht trennen. Es werden deshalb die entsprechenden Summenwerte angegeben, die als Maximalwerte der Kongeneren mit 2378-Cl-Substitutionsmuster anzusehen sind. Die Wiederfindung der eingesetzten internen Standards (Extraktionsstandard) bezogen auf das $^{13}\text{C}_{12}$ -1234-TetraCDD, als Maß für die Zuverlässigkeit der Probenaufbereitung, sollten zwischen 50% und 115% liegen.

Messgeräte: GC 5890 II von Hewlett Packard,
MSD 5971 bzw. 5973 von Hewlett Packard

